

# INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 29 de noviembre de 1976.

---

Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano  
**MAESTRÍA EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES**



## **POZOS DE INYECCIÓN PROFUNDA: RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS CON AGUAS PLUVIALES Y DISMINUCIÓN DE INUNDACIONES EN EL AMG.**

Trabajo de Obtención de Grado que para obtener el grado de  
**MAESTRO EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES**

Presenta: Ing. Luis Ignacio Vanegas Espinosa

Tutor: Dr. David Vargas del Río

San Pedro Tlaquepaque, Jalisco. noviembre de 2017.

<b>Agradecimientos .....</b>	<b>2</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>4</b>
1.1 Antecedentes.....	4
1.2 Justificación.....	7
1.3 Marco Teórico .....	9
1.4 Tipo de estudio .....	16
1.5 Preguntas de investigación .....	16
1.6 Objetivos.....	17
1.7 Hipótesis .....	18
<b>2. Metodología.....</b>	<b>19</b>
2.1 Selección del modelo operacional .....	19
2.2 Diseño de instrumentos y pruebas .....	21
<b>3. Resultados y discusión .....</b>	<b>24</b>
3.1 Descripción de resultados .....	24
3.1.1 Definición de zona de estudio y sus características .....	24
3.1.2 Cálculo del caudal máximo.....	38
3.1.3 Resultados del modelado de infiltración .....	40
3.1.3 Resultados de entrevista informal .....	48
3.1.3 Cotización de perforación, ademado e instrumentación de pozo .....	49
3.2 Discusión y conclusiones.....	51
<b>Glosario .....</b>	<b>53</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>55</b>
<b>4. Anexos .....</b>	<b>60</b>
4.1 Resolución 4284217 del SIAPA.....	60
4.2 Concentrado de Estudios de Mecánica de Suelos .....	68
4.3 Documentos entregados por Ing. Agustín Vargas .....	76
4.4 Cotización de perforación y ademe para pozo de inyección profunda.....	82
4.5 Cotización de instrumentación para muestreo y monitoreo en pozos .....	84

## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo para la realización de este trabajo.

A los profesores Oscar Castro, Mara Cortés, Rodrigo Flores, Alejandro Mendo, Santiago Vergara y Sarah Obregón por su importante aportación en mi aprendizaje durante esta Maestría.

A los ingenieros Pablo Enrique Zamudio Zavala, Florencio González Dávila y Juan Carlos Santana Santana por su apoyo y compartir datos imprescindibles para la realización de este proyecto.

Al Ing. Samuel Frausto Barajas por todas las oportunidades y apoyo otorgado antes y durante este proceso.

Al Dr. Gil Humberto Ochoa González por sus comentarios, experiencias compartidas y las asesorías fundamentales para llevar a cabo este Trabajo de Obtención de Grado.

Al Ing. Agustín Vargas por compartir sus experiencias en obras de infiltración en el AMG y sus invaluable recomendaciones para poder desarrollar este proyecto.

A mi tutor el Dr. David Vargas del Río por su indispensable apoyo, revisiones detalladas, constantes asesorías y el empuje necesario para que este trabajo llegara a los objetivos propuestos.

A mis amigos por ser y estar durante este proceso.

A mi familia que son el agua indispensable para la realización de todo.

## Resumen

La aplicación de estrategias para responder a los efectos negativos de la **sobreexplotación de acuíferos** es una actividad principal propuesta en el Programa 21 de la ONU con el fin de proteger el suministro de agua dulce. En el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG), el suministro de agua potable depende en un 30% de la extracción del líquido de los acuíferos Atemajac y Toluquilla, los cuales se encuentran sobreexplotados. Además, debido a la impermeabilización de los suelos con pavimentos y edificaciones, lejos de aprovecharse las **aguas pluviales** se convierten en problemas de inundaciones. En este contexto, los pozos de inyección profunda han demostrado ser una opción capaz de recuperar acuíferos y desalojar aguas superficiales bajo ciertas condiciones geológicas, como las que presenta el AMG. Para validar el potencial para infiltrar agua en el AMG con esta tecnología se realizó la modelación numérica de un **pozo de inyección profunda** característico mediante elementos finitos, acompañada del planteamiento de una intervención basada en los resultados de la modelación en una cuenca urbana que presenta inundaciones recurrentes y aguas subterráneas sobreexplotadas. La caracterización del perfil estratigráfico del subsuelo, necesario para realizar la modelación numérica, se obtuvo con base en la información de 38 Sondeos de Penetración Estándar. Por su parte, las condiciones para la construcción de los pozos de inyección profunda se determinaron mediante sistema de información geográfica: se identificaron microcuencas, pendientes, escurrimientos, relaciones con puntos de inundaciones recurrentes y zonas con profundidad del estrato rocoso mayor a 60 metros. Con esta base se hace un cruce entre el volumen de agua superficial disponible para infiltrar en la cuenca estudiada y la capacidad de un sistema de pozos diseñado con el fin de infiltrar dicho volumen. Los resultados demuestran -para la cuenca estudiada y por extrapolación en la zona norte, centro, sur y poniente del AMG que poseen condiciones geotécnicas similares- un alto potencial de infiltración y la posibilidad de eliminar las inundaciones recurrentes y recargar los acuíferos actualmente sobreexplotados.

### Palabras clave:

Pozo de inyección profunda; Sobreexplotación de acuíferos; Recarga artificial de acuíferos; Aprovechamiento de aguas pluviales.

### LGAC: Análisis y gestión de infraestructura y equipamiento sustentable



## 1. Introducción

### 1.1 Antecedentes

La escasez de agua es un problema ambiental mundial que puede reducirse mediante una buena gestión y la utilización de algunas tecnologías. La Organización de las Naciones Unidas, a través del plan de acción Agenda 21, llama la atención mundial por la destrucción de fuentes de abastecimiento y contaminación de las fuentes de agua dulce (ONU, 1992). Entre las soluciones destacadas está la implementación de tecnologías innovadoras que formen parte de la planificación y ordenación de los recursos hídricos. Esto traería como beneficio el mantenimiento del suministro idóneo del recurso para toda la población y al mismo tiempo preservar las funciones hidrológicas de los ecosistemas. Propone actividades como la ampliación de sistemas de captación de agua de lluvia, programas urbanos de drenaje, de evacuación de aguas pluviales y la adaptación de las actividades humanas a los límites de la naturaleza.

En México la gestión hídrica presenta diversas áreas de oportunidad: de acuerdo con datos recabados en 2010 por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), aún hay más de 13 millones de mexicanos sin servicio de agua potable y 12 millones sin drenaje (INEGI. 2011). Sumado a esto, los acuíferos están siendo sobreexplotados (es decir, se extrae más agua de la que se recarga) y poco se sabe de la calidad del agua contenida en ellos (Jiménez et al., 2004). Siendo los acuíferos la fuente de abastecimiento para 75 millones de mexicanos, la Comisión Nacional del Agua reporta que más de 100 de los 653 acuíferos se encuentran sobreexplotados (Diario Oficial de la Federación, 2015). Si se continúa con esta tendencia, el abastecimiento de agua potable representará una importante fuente de problemáticas sociales y medioambientales.

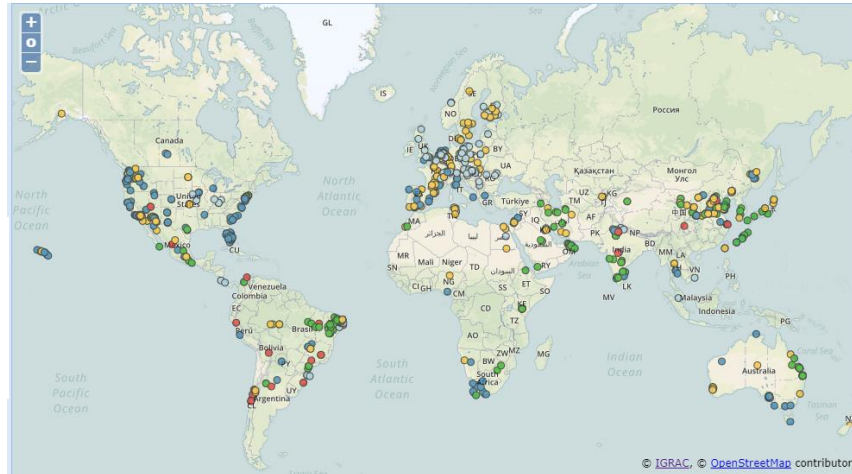
Los Sistemas de Drenaje Urbano Sustentable (SUDS) destacan como una estrategia sustentable para la gestión hídrica. A nivel mundial se han adoptado diferentes líneas de estrategias entre las que resalta el diseño de SUDS. Los SUDS son sistemas que se enfocan al manejo pluvial, buscando su infiltración y el manejo eficiente del agua, es decir, desarrollando sistemas que controlen el agua cerca de donde se precipita (Jose, R., Wade, R., & Jefferies, C., 2015). También, a través de estos sistemas se busca que se generen beneficios directos a los lugares donde se aplican para así mejorar la calidad de vida, trabajo y juego. Los SUDS proponen 12 tecnologías para favorecer una gestión hídrica sustentable: captación de agua de lluvia, techos verdes, sistemas de tratamiento, líneas superficiales de drenaje con filtros de agregados permeables o con vegetación, canales superficiales con vegetación, sistemas de bioretención, tanques de almacenamiento para atenuación de escurrimientos, vasos reguladores superficiales, pavimentos permeables, estanques e infiltración. En específico los sistemas de infiltración contribuyen a la disminución del volumen de escurrimiento superficial y al mismo tiempo aporta para los procesos de recarga de agua subterránea. (Woods Ballard, B et al., 2015)

Mientras que el concepto de SUDS fue acuñado en el Reino Unido, en otros países se adoptaron algunos principios y se diseñaron otros sistemas y conceptos, por ejemplo, en Australia se refieren a Diseño Urbano Sensible al Agua (WSUD por sus siglas en inglés), cuya definición según el gobierno australiano es:

*“La integración de la planeación urbana con la administración, protección y conservación de un ciclo hidrológico urbano que asegure que el manejo urbano del líquido sea sensible a los procesos hidrológicos y ecológicos naturales”* (COAG 2004 en Greater Sidney Local Land Services, 2014:pag 18)

En cuanto a infiltración, Fernández Escalante et al. (2005) menciona que la técnica de recarga artificial de acuíferos se ha posicionado como un elemento de gestión hídrica económica y eficiente en comparación con las grandes obras hidráulicas. Por recarga artificial se entiende como una serie de técnicas que tienen como objetivo un mejor aprovechamiento de los acuíferos mediante el aumento y creación de reservas, interviniendo directamente en el ciclo natural del agua (Freeze y Cherry en Fernandez Escalante et al, 2005). Setefan y Ansems (2016), concluyen que se han implementado diferentes técnicas de recarga artificial de acuíferos en todo el mundo que han contribuido a maximizar el almacenamiento natural en los acuíferos, a mejorar el manejo de la calidad del agua y de los sistemas de distribución y, por tanto, representan un progreso ecológico. Sin embargo, también comentan que mientras que muchos expertos en hidrogeología y geotecnia están de acuerdo con las ventajas de la recarga artificial, la mayoría de los organismos reguladores del agua no ven estas técnicas como algo viable. Por esto, aseguran que esta falta de apertura es un error ya que la evidencia empírica ha venido dando la razón a los primeros y, si bien anteriormente estas técnicas se percibían como tecnologías emergentes y riesgosas, la cantidad de experiencias en diferentes zonas del planeta demuestran que la aplicación de esquemas de recarga artificial dentro de la gestión hídrica ha ampliado el suministro de agua, la seguridad hídrica y el mejoramiento de la calidad del agua. Ciertamente, se trata de una tecnología extendida y comprobada, lo cual se deduce al observar la figura 1 en la que el Centro Internacional de Evaluación del Agua Subterránea (IGRAC, por sus siglas en inglés) mapeó todas las experiencias de recarga artificial del mundo categorizadas en 5 diferentes grupos de tecnologías: infiltración por extensión, filtración inducida, recarga por pozos, modificación en cauces y recolección de agua de lluvia/escorrentía. Desgraciadamente la mayoría de los casos se concentran en Europa y Asia. Siguiendo con la figura 1, en México se observan 16 experiencias en sistemas de recarga artificial de acuíferos. Estos casos se encuentran distribuidos en los estados de Aguascalientes, Baja California Sur, Baja California, Chihuahua, Coahuila, Durango, Estado de México, Oaxaca, San Luis Potosí y Sonora. Villarreal *et al* (2014) documentan 12 de estas experiencias donde se contemplan distintas técnicas de recarga artificial de acuíferos. Un ejemplo de estas tecnologías ya instaladas son unas lagunas de infiltración en la frontera de Coahuila con Durango. Esta instalación comprende la conducción del agua de la presa Francisco Zarco hacia embalses de infiltración con los objetivos de recuperar niveles de agua subterránea, mejorar la calidad de agua infiltrada y establecer un programa de medición mediante pozos de monitoreo.

- Infiltración por extensión
- Filtración inducida
- Recarga por pozos
- Modificación en cauces
- Recolección de agua de lluvia y escorrentía



**Figura 1. Mapa de experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo (C. Stefan & N. Ansems, 2016)**

Dentro de estas técnicas se encuentran los pozos de infiltración o de inyección profunda, que son básicamente pozos verticales que reciben las aguas superficiales para recargar los diferentes estratos del subsuelo (Custodio, Emilio, 1996a). Como se verá, esta tecnología es la que abordaremos en este trabajo, pues, como se revisa más adelante es la que se adapta mejor a las condiciones geotécnicas del AMG: estratos alternados de diferente permeabilidad, superficie urbanizada y lecho profundo de alta porosidad. En este sentido, en México se reportan dos proyectos de pozos de inyección profunda, uno en Aguascalientes y otro en Ciudad Juárez. El proyecto de Ciudad Juárez está contemplado para infiltrar los escurrimientos pluviales de la ciudad, sin embargo, no se reporta la instalación de este proyecto o avances del mismo. En el caso del proyecto de Aguascalientes, ya se están inyectando 50 l/s de agua proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales mediante la instalación de tres pozos de inyección profunda acompañados de 11 piezómetros de control y monitoreo (AREMA, 2017). Con esto se genera un precedente importante en el país al aplicar este tipo de tecnologías de recarga directa.

## 1.2 Justificación

Burkner y Ochoa-García (2012), con base en datos de INEGI, destacan que en México se cumple con el 88% de cobertura global del servicio de agua potable; sin embargo, también contrastan esta cifra con una dotación desigual para las diferentes regiones del país. Es decir, los estados ubicados en las regiones más áridas tienen mayor cobertura que aquellos que tienen más recursos hídricos, lo cual lo consideran como un reflejo de que “el problema en la gestión del agua radica en la desigualdad e inequidad social” (Bürkner & Ochoa García, 2012). Los conflictos de distribución ecológica derivados del mal manejo del agua son presentes en distintas entidades del país como se observa en la figura 2. Estos conflictos generan enfrentamientos entre comunidades, desplazamientos e impactos ambientales. Así, la problemática del agua conviene complejizarla y abordarla desde aportaciones colectivas y generación de propuestas que abonen a una gobernanza que responda a la realidad hídrica del país.

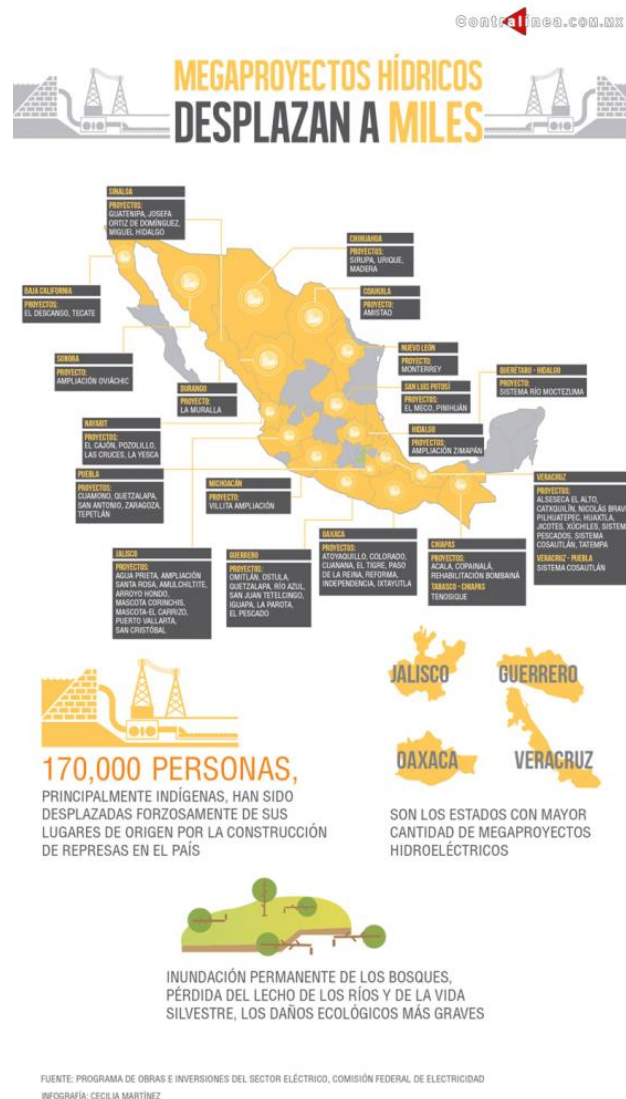


Figura 2. Megaproyectos hídricos. Fuente: (Ramírez, 2013)

El agua es un recurso escaso en el AMG a pesar de que las precipitaciones y las fuentes de agua son abundantes. Según la Comisión Estatal del Agua Jalisco (2009), el AMG es abastecida de agua desde tres principales fuentes: el lago de Chapala, los pozos profundos y la presa Calderón. En conjunto aportan  $9.5\text{m}^3/\text{s}$ , cuando de acuerdo lo que establece el Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado (2014) y la Comisión Estatal del Agua (2009) para las dotaciones de agua potable en litros diarios para diferentes tipos de edificación se requerirían  $13.06\text{m}^3/\text{s}$ . Otra problemática son las fugas que, según datos que el SIAPA entregó a una calificadora financiera en 2015, ascienden al 30% del agua que llega a las plantas potabilizadoras (Castillo, 2016). En el caso de que se eliminaran las fugas y se elimine el clandestinaje y se recuperara el 30% documentado por el SIAPA, aún existiría un déficit de  $0.71\text{m}^3/\text{s}$ , es decir, se seguiría requiriendo de más agua y las fuentes actuales no pueden aportar mayor cantidad de la que ya lo hacen. Sumado a estos factores, no existe una cultura de aprovechamiento de las precipitaciones, la cual es una fuente con gran potencial ya que anualmente llueven 942mm (Comisión Nacional del Agua, 2000). Dentro del parámetro establecido por la Organización Mundial Meteorológica está dentro de la clasificación de precipitación suficiente (Gleason, 2014). La mala gestión del agua en el AMG y el potencial de contribución de las precipitaciones se demuestran si se hace un ejercicio rápido: si se multiplica la precipitación promedio anual que recibe el AMG, 942mm, por los  $2,734\text{ km}^2$  que es el área que comprende (Ramírez, 2013), y lo dividimos entre 31'536,000 segundos anuales, obtenemos un caudal de agua igual  $81,666.28\text{m}^3/\text{s}$ ; es decir, el AMG sólo se requiere aprovechar el 0.016% de las precipitaciones que recibe para autoabastecerse. La escasez hídrica del AMG no responde a condiciones naturales, ha sido creada socialmente.

En cuanto a esto, Ochoa (2016) expone que los conflictos del agua en torno al AMG son presentados como situaciones aisladas. En este sentido, menciona cómo tanto en sitios con problemas reconocidos como el Lago de Chapala, la laguna de Cajititlán, el río Santiago, o los niveles freáticos abatidos, hay una constante: todos están conectados a una urbe que ha ido incrementando su radio de influencia. Por lo que concluye que, al incrementar el radio de influencia, crece y se utiliza el agua de una forma que genera desigualdad y aumenta los costos ambientales. También afirma que la inversión en infraestructura se centra en traer más, sin tomar en cuenta otras medidas, haciendo más visible la relación entre el mal manejo del agua en el AMG y la falsa necesidad de hacer megaproyectos hídricos antes de considerar prácticas que busquen un manejo integral y sustentable del agua. Aunado a esto, existe un grave problema de inundaciones cada año. Para dimensionar la problemática de las inundaciones, en tan solo el año 2015 las inundaciones causaron la muerte de nueve personas y pérdidas económicas de aproximadamente mil millones de pesos (Castillo, 2016)

Así, la mala gestión del agua ocasiona escasez en el periodo de estiaje e inundaciones en época de lluvias. También se hacen presentes la mala calidad de los servicios públicos del agua, el deterioro de las cuencas, la sobreexplotación de acuíferos, el desperdicio de agua, entre otros elementos (Bürkner & Ochoa García, 2012).



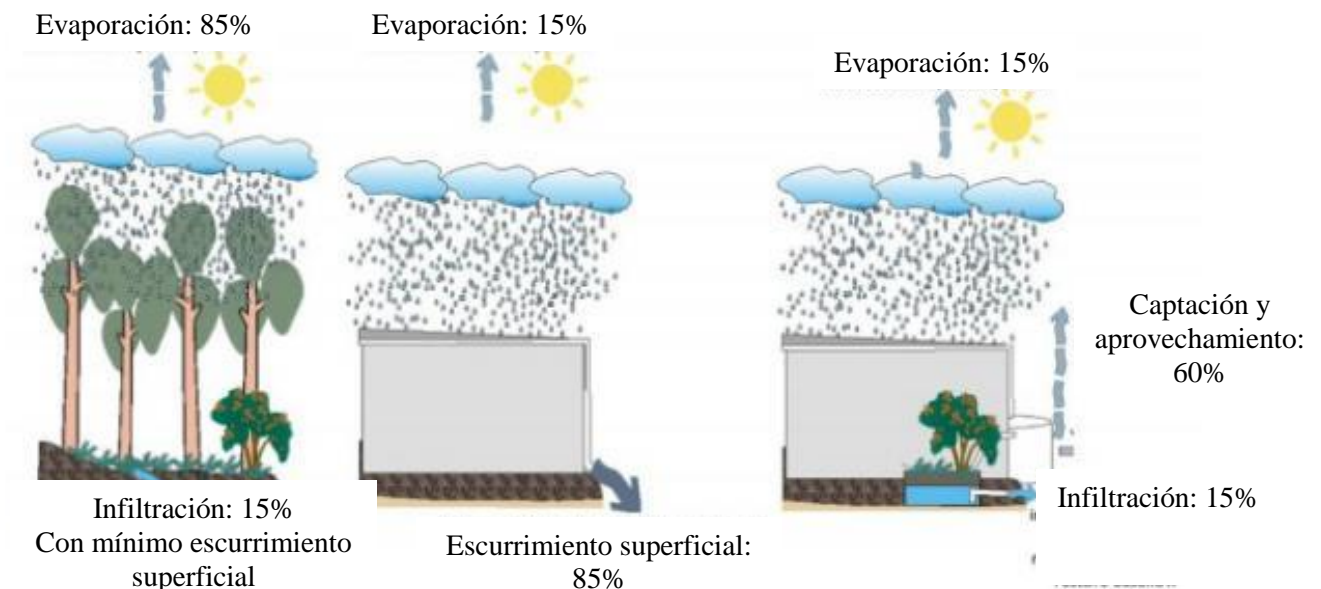
Por los problemas mencionados anteriormente, se propone un sistema de recarga artificial a través de pozos de inyección profunda aprovechando el agua pluvial. A partir de esta tecnología que consideramos estratégica se pretenden disminuir los conflictos ambientales derivados de la mala gestión mediante una solución técnica aplicable al AMG y su población. Una ventaja importante de este sistema es que la extensión territorial que requiere es considerablemente menor a la requerida por humedales o lagunas de infiltración. Además, trae beneficios importantes como la capacidad de reducir inundaciones y aumentar la recarga de los acuíferos. Por lo tanto, en este proyecto se pretende abonar a este esfuerzo con una solución técnica aplicable al AMG y a su población. En este sentido, 30% del agua suministrada para consumo humano en el AMG proviene de pozos profundos (Comisión Estatal del Agua, 2009). Esto tiene fuertes implicaciones en los acuíferos principales sobre los cuales está el AMG: Atemajac y Toluquilla, ambos con niveles de sobreexplotación. El primero con un déficit de 11 millones de metros cúbicos y el segundo de 72 millones de metros cúbicos (Diario Oficial de la Federación, 2015). En el ámbito de la sustentabilidad, el proyecto, al ser técnico, tiene rasgos de lo que Tetreault (2015) llama Modelo Dominante de Desarrollo Sustentable, donde las tecnologías son diseñadas para mejorar la eficiencia ecológica de las actividades económicas. Sin embargo, este proyecto no está enfocado en mejorar la eficiencia ecológica de una actividad económica en específico, si no del funcionamiento de la ciudad, directamente en el sistema de drenaje e indirectamente al sistema de abastecimiento de agua potable, por lo que el proyecto es técnico con fuerte implicación social.

### 1.3 Marco Teórico

Como modelos referentes de diseño de técnicas sustentables en el manejo de agua urbana se utilizaron los SUDS y el WSUD. En el artículo de “Smart SUDS” (Jose, Wade, & Jefferies, 2015) los SUDS se describen como un método en el que los escurrimientos de aguas pluviales se manejan de tal forma que se reduzcan los volúmenes de escurrimiento en muy cortos periodos de tiempo, a través de infiltración o de la utilización de sistemas de captación de agua de lluvia. Es decir, la filosofía de los SUDS es maximizar los beneficios y al mismo tiempo minimizar los impactos negativos de los escurrimientos superficiales en áreas urbanas. En este modelo, la infiltración es descrita como un elemento que contribuye a reducir los volúmenes y tasas de escurrimiento, mientras se favorecen procesos de recarga de los acuíferos. Hace especial mención en el diseño de elementos de pre-tratamiento para evitar infiltrar contaminantes que estén mezclados con el agua, así como en el cuidado de no generar inestabilidad en los suelos donde se lleve a cabo este proceso (Woods Ballard, B et al., 2015).

Gleason (2014) define al WSUD como un diseño que deriva de una gestión sustentable en donde exista una correlación entre aprovechar el agua y los espacios urbanos al mismo tiempo, es decir, un diseño y construcción de paisaje urbano que minimice los impactos sobre el ciclo urbano del agua (suministro de agua potable, tratamiento de aguas residuales y manejo de aguas pluviales). En la figura 3 se muestran los cambios en el balance hidrológico como resultado de la urbanización y de los efectos positivos de utilizar medidas como la

captación de agua de lluvia, filtración, infiltración e irrigación. Siguiendo con la figura 3 en específico es importante observar la cantidad de escurrimiento, donde en condiciones naturales es igual al 15% y en condiciones urbanizadas llega a ser del 85% del total de la precipitación. Al tener este volumen de agua como escurrimiento es necesaria una red de tuberías y canales de grandes dimensiones que resulta costoso e inoperante en muchas ocasiones. Así, aplicando estrategias de infiltración e irrigación, ese volumen de escurrimiento puede ser encausado a ríos, arroyos y particularmente acuíferos, para restaurar el flujo base de dichos cuerpos de agua. En el caso de los acuíferos, al recargar estos cuerpos de agua se obtiene un beneficio primordial el cuál es disponer de agua subterránea en época de estiaje. Es decir, durante el temporal de lluvias se recarga y en época de estiaje se extrae, teniendo un aprovechamiento más sustentable del agua subterránea.



**Figura 3. Cambios al ciclo hidrológico por urbanización y propuesta de WSUD. (Traducción del autor basada en [www.wsud.org](http://www.wsud.org), 2015)**

En cuanto a manejo de aguas pluviales dentro del WSUD, el Centro de Investigación Cooperativa para Ciudades Sensibles al Agua (CRCWSC, por sus siglas en inglés) -en Melbourne, Australia- publicó en 2013 el libro *"Blueprint 2013. Stormwater Management in a Water Sensitive City"* en el que se establecen y desarrollan los 3 pilares del diseño urbano sensible al agua: ciudades como cuencas de suministro de agua, ciudades que proveen beneficios al ecosistema y ciudades con comunidades sensibles al agua. Cabe destacar el primer pilar en el que se desarrollan guías para el reciclado del agua, uso del agua pluvial, recarga artificial de acuíferos y el aumento de reservas de agua potable; indicando las consideraciones clave para cada uno de estos casos, la mayoría en torno a cuestiones de salud y calidad del agua. Como ciudad que provee beneficios al ecosistema se busca que el entorno construido suplemente y promueva las funciones naturales de un ecosistema y una sociedad. En el caso del AMG, resulta aventurado pensar que sea una ciudad que provea beneficios al ecosistema, pero como se verá más adelante, las características hidrológicas, topográficas y

geotécnicas de la región, posibilitan acercarse a un escenario más parecido al representado en la imagen de la extrema derecha de la figura 3, donde la tasa de infiltración, captación y aprovechamiento disminuyan significativamente los escurrimientos superficiales.

Cabe mencionar que una buena solución técnica no es suficiente. En la búsqueda de ciudades con comunidades sensibles al agua se mencionan estrategias y puntos clave para un proceso de diseño cooperativo gobierno-sociedad. El CRCWSC establece 9 factores clave para fomentar la difusión de la tecnología: capital socio-político, redes multidisciplinarias, contabilidad, ciencia confiable y verídica, receptividad del mercado, organizaciones que funcionen como puente entre la ciencia y las políticas, objetivos medibles, estrategias para obtener fondos y proyectos demostrativos. Aquí nos concentraremos en la solución técnica basada en la recarga artificial de acuíferos mediante pozos profundos como principio de una propuesta que podría volverse una solución hidrológica integral debido a las ventajas descritas en el apartado anterior.

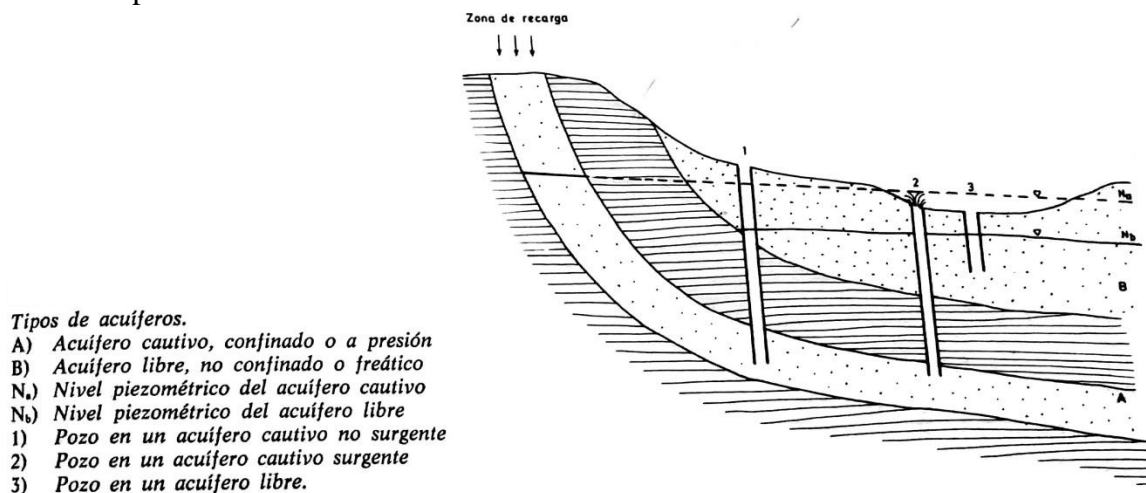
Debido a que este proyecto se centra en la recarga artificial de acuíferos, es necesario definir el concepto de acuífero. Custodio (1996) los define como formaciones geológicas que permiten la circulación del agua por los poros o grietas de sus estratos. Esto genera una fuente de abastecimiento que puede ser aprovechada en cantidades económicamente apreciables. Los acuíferos están formados por depósitos no consolidados de materiales, como arenas o gravas, de origen geológico distinto cuyas características como la densidad, porosidad y permeabilidad varía enormemente y depende del ambiente sedimentario existente en su formación (Custodio, 1996). Estas formaciones geológicas pueden ser entendidas como sistemas que poseen un funcionamiento regulado por la recarga, las extracciones y otros procesos. Para que este sistema funcione y se pueda definir la respuesta del acuífero frente a acciones exteriores, existen tres parámetros fundamentales de las cuales depende: porosidad, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento. Estos parámetros establecen una clasificación de los acuíferos por sus características litológicas.

Permeabilidad (m/día)	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>	10	1	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>
Tipo de terreno	Grava limpia		Arena limpia; mezcla de grava y arena			Arena fina; arena arcillosa; mezcla de arena, limo y arcilla; arcillas estratificadas			Arcillas no meteorizadas		
Calificación	Buenos acuíferos					Acuíferos pobres			Impermeables		
Capacidad de drenaje	Drenan bien					Drenan mal		No drenan			

**Figura 4. Calificación de acuíferos respecto a su permeabilidad. Fuente: elaboración propia a partir de Benitez en Custodio (1996)**



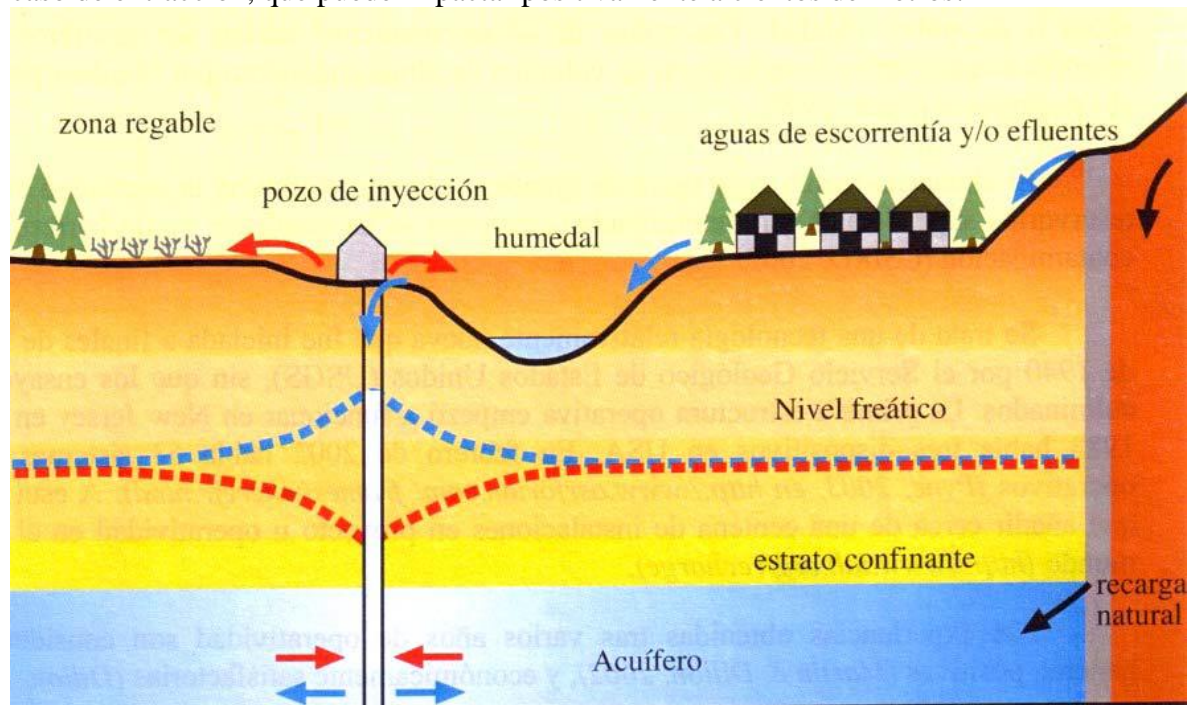
Otra clasificación importante de los acuíferos puede hacerse a partir de la presión hidrostática del agua que está dentro de los mismos. Existen los acuíferos libres, que son aquellos donde una superficie libre del agua dentro de ellos está en contacto directo con el aire, es decir, a presión atmosférica; y los acuíferos confinados, donde el agua está sometida a una presión mayor a la atmosférica y satura por completo la formación geológica que lo contiene. También existe un tercer caso, los acuíferos semiconfinados, que son similares a los confinados, con la diferencia de que la parte inferior o superior que los encierra no sea totalmente impermeable y permita una filtración lenta de agua que alimenta al acuífero principal, siendo esto posible solamente cuando existe una diferencia de potenciales entre ambos (Custodio, 1996). En la figura 5 se ilustra un ejemplo de configuración de acuíferos, donde se observa un acuífero confinado que se encuentra entre dos estratos impermeables que lo mantienen confinado. Así mismo, se identifica un acuífero libre el cual tiene un flujo libre hacia la superficie dependiendo de la topografía del lugar. Finalmente, como se puede observar en la misma figura para el aprovechamiento del agua contenida en los acuíferos, es necesaria la creación de pozos verticales que lleguen hasta el acuífero que permitan la extracción del agua contenida dentro del mismo. Existen tres tipos de pozos: surgentes, artesianos o pozo en acuífero libre.



**Figura 5. Tipos de acuíferos de acuerdo a presión hidrostática del agua y tipos de pozos. Fuente: Custodio (1996)**

Lo opuesto a la extracción es la recarga artificial, la cual Fernández Escalante (2010) describe como una herramienta de gestión hídrica económica que ha comprobado gran efectividad con respecto a los macroproyectos hidráulicos. En varios países de Europa, en Estados Unidos y Australia, estas técnicas son muy utilizadas. Por ejemplo, en las ciudades de Dusseldorf y Budapest se depende en 100% de aguas provenientes de la recarga artificial (Fernández Escalante, Enrique et al., 2005). Así mismo, en Australia y Nueva Zelanda también se han desarrollado estas técnicas, como la representada en la figura 6, que es un sistema mixto de humedales y pozo de inyección profunda. En dicha figura se observan dos líneas punteadas, una en azul y una en rojo. Estas líneas ilustran cómo un pozo de extracción

y un pozo de recarga afectan en los niveles freáticos. Es decir, la línea roja corresponde a un cono de abatimiento, que ocurre cuando se está extrayendo agua del pozo y puede afectar a varios cientos de metros cuando se lleva a cabo una sobreexplotación muy acentuada. Por el contrario, la línea azul corresponde al momento en que ese pozo se utiliza para recargar de manera artificial el acuífero, donde las presiones generan un cono invertido en relación al caso de extracción, que puede impactar positivamente a cientos de metros.



**Figura 6. Ejemplo de instalación de recarga artificial de acuíferos. Fuente: (Dillon & Pavelic en Fernández Escalante, Enrique et al., 2005)**

Como se comentó anteriormente, en México se han desarrollado algunos proyectos de recarga artificial, sobre todo en regiones del norte y centro del país. Otro ejemplo además de los ya mencionados es el expuesto por Rubén Chávez (2011) en San Luis Río Colorado, Sonora, donde se utilizaron lagunas anaeróbicas de tratamiento de aguas residuales, que se impermeabilizaron en el fondo y taludes con telas de polipropileno para evitar la infiltración, para después llevar el líquido a lagunas de infiltración de 120m x 120m.

Los sistemas de recarga artificial se pueden dividir en tres: sistemas de recarga en superficie, en profundidad y mixtos. El funcionamiento de los superficiales (zanjas, estanques o el acondicionamiento de cauces de ríos) consiste en incrementar la superficie de contacto agua-terreno y son útiles para usarse en acuíferos libres. Dentro de los sistemas de recarga en profundidad se encuentran los drenes radiales, galerías de infiltración y los que son sujeto de este proyecto de investigación, los pozos verticales. Por último, los sistemas mixtos de recarga están formados por elementos tanto superficiales como profundos, y pueden ser ideales para dar solución a los problemas presentados por los sistemas mencionados anteriormente. Como indica Custodio (1996), la recarga por pozos presentan mayor conste

de construcción y mantenimiento, así como la necesidad de utilizar agua de mejor calidad, sin embargo:

*Es una forma de recarga insustituible cuando el terreno está formado por una alternancia de niveles permeables e impermeables (...) Una ventaja, decisiva en muchos casos, es que la ocupación del terreno es pequeña (...) y ello es fundamental en zonas urbanas” (Custodio, Emilio, 1996)*

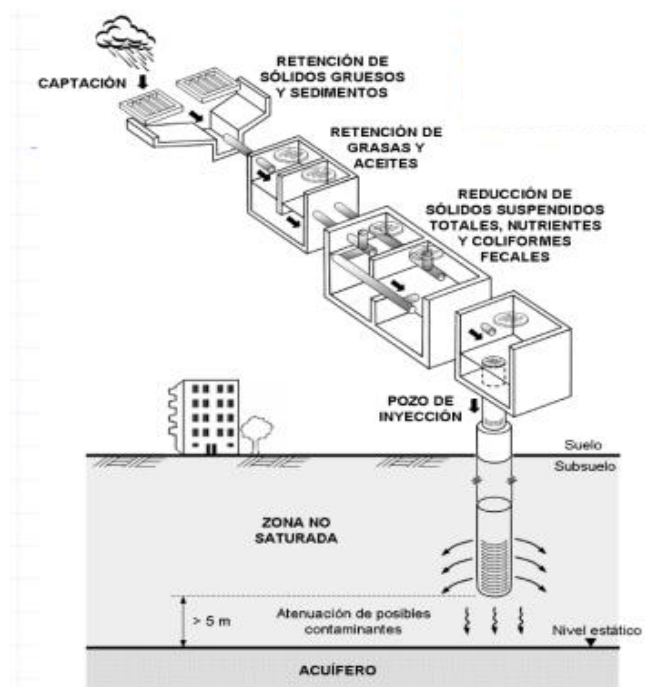
Otra ventaja del pozo vertical es que se pueden recargar todas las capas que se desee. Así, es posible recargar -a través de capas menos explotadas- las capas que más se bombean y generar un mayor recorrido del agua en el acuífero para evitar problemas de contaminación y logrando una mezcla más homogénea. Esto siempre y cuando el agua pueda pasar con facilidad de un nivel a otro. El rendimiento de estos pozos depende de la permeabilidad del acuífero y del estado de colmatación del mismo pozo (Custodio, Emilio, 1996).

Hablando en específico del caso del AMG, en el Registro Público de Derechos de Agua (CONAGUA, 2015), se puede encontrar la extracción autorizada de los acuíferos de todo el país. En el acuífero de Atemajac están registrados 1,072 pozos con una extracción de 130.5 millones de metros cúbicos de agua anuales. Sin embargo, la extracción autorizada es diferente de la extracción que puede realizarse. Como se ha mencionado están siendo sobreexplotados. De acuerdo con la resolución 4284217 enviada por el SIAPA el 9 de octubre del 2017 a través del portal del Instituto de Transparencia, Información Pública y Protección de Datos Personales (ITEI), los pozos del acuífero Atemajac presentan un nivel estático promedio de 68 metros de profundidad, mientras los niveles dinámicos arrojan un promedio de 113 metros de profundidad. Esta variación tan alta, se comentó con el Ing., Agustín Vargas, hidrólogo especialista de las condiciones del AMG, y menciona que puede deberse a cuestiones locales en las inmediaciones de los pozos: capilaridad o colmatación asociada a desuso. Por lo que sugiere que, considerando que las mediciones fueron realizadas al final del temporal de lluvias y a falta de datos, el nivel estático reportado no es realmente el nivel superior del acuífero. Siendo así, probablemente, el nivel dinámico un valor más cercano al nivel superior del acuífero.

Con base en todo esto, consideramos que una recarga con pozos verticales puede ser la mejor solución para la geología y condiciones del AMG. Una solución técnica capaz de contribuir de forma importante a la gestión hídrica sustentable. Cabe mencionar, para evitar confusiones, que no nos estamos refiriendo al tipo de recarga que se realiza actualmente en el AMG mediante la instalación de pozos verticales sub-superficiales conocidos como pozos de absorción. En este sentido, al no haber un diseño y selección respaldada formalmente y no existir un pretratamiento, esta tecnología ha generado problemas como la erosión subterránea de rellenos realizados en cauces fluviales y contaminación de acuíferos. Nos referimos a una infiltración profunda de aguas que cumplan una normativa. Siendo que la zona del subsuelo saturado se encuentra a más de 68 metros de profundidad, este proyecto se plantea ubicar sitios aptos llevar a cabo la infiltración a esas profundidades y así evitar los problemas de erosión que afecten las cimentaciones de las edificaciones. Y deja para futuras

investigaciones el diseño del sistema de pretratamiento que, debe decirse, no es complicado y puede tomar esquemas diversos.

En cuanto a normativa mexicana sobre la recarga artificial de acuíferos, la Comisión Nacional del Agua emitió la NOM-014-CONAGUA-2003, “Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada” y la NOM-015-CONAGUA-2007, “Infiltración artificial de agua a los acuíferos. - Características y especificaciones de las obras y del agua”. Debido a que el proyecto no se enfoca a la recarga con aguas residuales tratadas, se considera que estará dentro del marco de la última norma mencionada. En la figura 7 se observa una propuesta de instalación de pozo de inyección profunda bajo la normativa de CONAGUA, Esta norma restringe la recarga artificial a zonas no saturadas (5 metros por encima del nivel estático), y obliga a un diseño de sistemas de pretratamiento y monitoreo tanto en superficie como en el acuífero (este último solamente si el gasto es mayor a 60 litros por segundo o si se instalan más de dos pozos).



**Figura 7. Ejemplo de recarga artificial con pozo de inyección. Fuente: CONAGUA (2014)**

En la figura 8, se expresan los valores máximos de contaminantes contenidos en el agua a infiltrar. Si bien el proyecto se acota al sistema de inyección y las condiciones del subsuelo, se hace mención de estos valores para que se contemplen el sistema de tratamiento previo a la inyección profunda y sirva como base para investigaciones futuras.

Contaminante	Unidad de medida	Límite	Método de prueba*	Método de muestreo
Grasas y Aceites	Mg/L	15	NMX-AA-005-SCFI-2000	NMX-AA-003-1980
Materia Flotante	Unidad	0	NMX-AA-006-SCFI-2000	
Sólidos Sedimentables	Mg/L	2	NMX-AA-004-SCFI-2000	
Sólidos Suspendidos Totales	Mg/L	150	NMX-AA-034-SCFI-2001	
Nitrógeno Total	Mg/L	40	NMX-AA-026-SCFI-2001	
Fósforo Total	Mg/L	20	NMX-AA-029-SCFI-2001	
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	No detectable	NMX-AA-042-1987	

**Figura 8. Límites de contaminantes en agua a infiltrar. Fuente: CONAGUA (2009)**

### 1.4 Tipo de estudio

Por lo planteado anteriormente, este proyecto de investigación aplicada estará enfocado en estudiar una solución técnica orientada a la inyección profunda en el Área Metropolitana de Guadalajara. Se estudiará la viabilidad de la solución, estimándolo a partir de algunas características de los suelos del AMG y el modelado de un pozo para después aplicar la solución a los escurrimientos de una microcuenca. En este proyecto no se abordará el diseño del sistema de pretratamiento ni de monitoreo. En resumen, se realiza investigación aplicada con el fin de evaluar una innovación tecnológica en el ámbito de la sustentabilidad. Luego, el alcance de la innovación se aplica en un caso de estudio en el contexto del AMG, con el fin de ilustrar el potencial de aportación a la sustentabilidad hídrica por uso extendido, a partir de una conocida homogeneidad de las condiciones geotécnicas y las problemáticas hídricas. Para esto se plantearon las siguientes preguntas de investigación.

### 1.5 Preguntas de investigación

Como pregunta principal se plantea la siguiente: ¿Cómo puede abonar la construcción de pozos de inyección profunda a la recarga de acuíferos, al aprovechamiento de aguas pluviales y a la disminución de inundaciones en el AMG?

Y partiendo de los datos requeridos para el desarrollo del proyecto, se desarrollaron 19 preguntas secundarias:

1. ¿Los rasgos geográficos y urbanos del AMG permiten aplicar un sistema de inyección profunda?
2. ¿Cuál es el volumen de agua pluvial aprovechable para las condiciones hidrometeorológicas del AMG, en una cuenca particular?
3. ¿Qué potencial tienen los acuíferos de ser recargados a partir de las características geológicas del AMG?
4. ¿Cómo se disminuirán los escurrimientos superficiales en una cuenca particular con la solución basada en pozos de inyección profunda?



5. ¿Cuál es la relación de las dimensiones de un pozo de inyección profunda con su eficiencia para recargar acuíferos, aprovechar aguas pluviales y disminuir inundaciones en una cuenca particular del AMG?

Así, los objetivos definidos para resolver los cuestionamientos mencionados se definieron de la siguiente manera.

### 1.6 Objetivos

El **objetivo general** de este proyecto es:

**estudiar la viabilidad de la inyección profunda como estrategia para la recuperación de acuíferos y la reducción de inundaciones en el AMG.**

Los objetivos particulares sus correspondientes objetivos específicos son los siguientes:

1. Identificar una cuenca dentro del AMG, propicia para evaluar la construcción de una solución basada en un sistema de pozos de inyección profunda.
  - 1.1. Identificar los rasgos geográficos y urbanos de la zona de estudio.
  - 1.2. Conocer la profundidad del estrato rocoso.
  - 1.3. Estimar los coeficientes de permeabilidad de los suelos de la zona de estudio.
  - 1.4. Conocer el nivel estático y dinámico de las aguas subterráneas en la zona de estudio.
  - 1.5. Conocer la capacidad de infiltración del suelo en la zona de estudio.
2. Evaluar escurrimientos de **aguas pluviales**.
  - 2.1. Identificar el volumen de agua pluvial aprovechable bajo criterios de hidrología superficial.
3. Pronosticar el porcentaje de **disminución de inundaciones** en la zona de estudio donde se proyecte la construcción de un sistema de infiltración mediante pozos de inyección profunda.
  - 3.1. A partir de la cantidad de agua pluvial infiltrada a través de pozos de inyección profunda, evaluar la disminución de escurrimientos superficiales.
4. Pronosticar el volumen de agua que puede **recargarse en el acuífero** mediante pozos de inyección profunda.
  - 4.1. Identificar los parámetros que condicionan la infiltración con base en el modelado numérico y las condiciones del subsuelo.
5. Proyectar la construcción de un **pozo de inyección profunda** para una futura validación.
  - 5.1. Identificar las normativas referentes a la infiltración de aguas pluviales con pozos de inyección profunda.
  - 5.2. Conocer el proceso constructivo y de instalación de un pozo de inyección profunda.

- 5.3. Dimensionar un pozo de inyección profunda y plantear su potencial de recarga artificial.
- 5.4. Proponer un sitio para su construcción.

### **1.7 Hipótesis**

En este proyecto se entenderá por pozos de inyección profunda a un sistema vertical de recarga artificial de acuíferos de profundidad mayor a 20 metros y que no se realiza en cauces fluviales rellenados; a la recarga artificial de acuíferos como una forma de abatir la sobreexplotación de las aguas subterráneas; al aprovechamiento de aguas pluviales como un proceso de captación, conducción e infiltración; y disminución de inundaciones a la reducción de los escurrimientos superficiales. Entendiendo así los conceptos, la hipótesis es que la construcción de pozos de inyección profunda abonará a la recarga de acuíferos, al aprovechamiento de las aguas pluviales y a la disminución de las inundaciones en el AMG.

## 2. Metodología

### 2.1 Selección del modelo operacional

Para este proyecto se abordaron tres unidades de análisis: la hidrología superficial del AMG, la geohidrología y el pozo de inyección profunda. En la figura 9 se esquematiza de forma general este modelo operacional con las unidades de análisis que detallan en la tabla 1. La hidrología superficial se abordó mediante un análisis en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Del análisis se obtuvieron escurrimientos y microcuencas y después se seleccionó una zona de estudio. La geohidrología se definió a partir de información secundaria: 38 Sondeos de Penetración Estándar que se realizaron dentro de la zona de estudio y alrededores por empresas de ingeniería geotécnica; esta información se integró para generar un Perfil Estratigráfico Tipo (PET). A partir de PET, se adjudicaron propiedades físicas al subsuelo de la zona de estudio, con base en ecuaciones de laboratorio obtenidas para arenas pumíticas del AMG (Zamudio, Vargas & Ochoa, 2016); se obtuvo información de la profundidad del estrato rocoso con base en un proyecto de investigación realizado por Zamudio & Gómez (2016). Con esta base, se pudo simular, mediante un modelo de elemento finito realizado en GEOSTUDIO, la capacidad de infiltración de un pozo de inyección profunda promedio. Así, teniendo la capacidad de infiltración del subsuelo y los escurrimientos superficiales, se cruzó información para diseñar una solución.

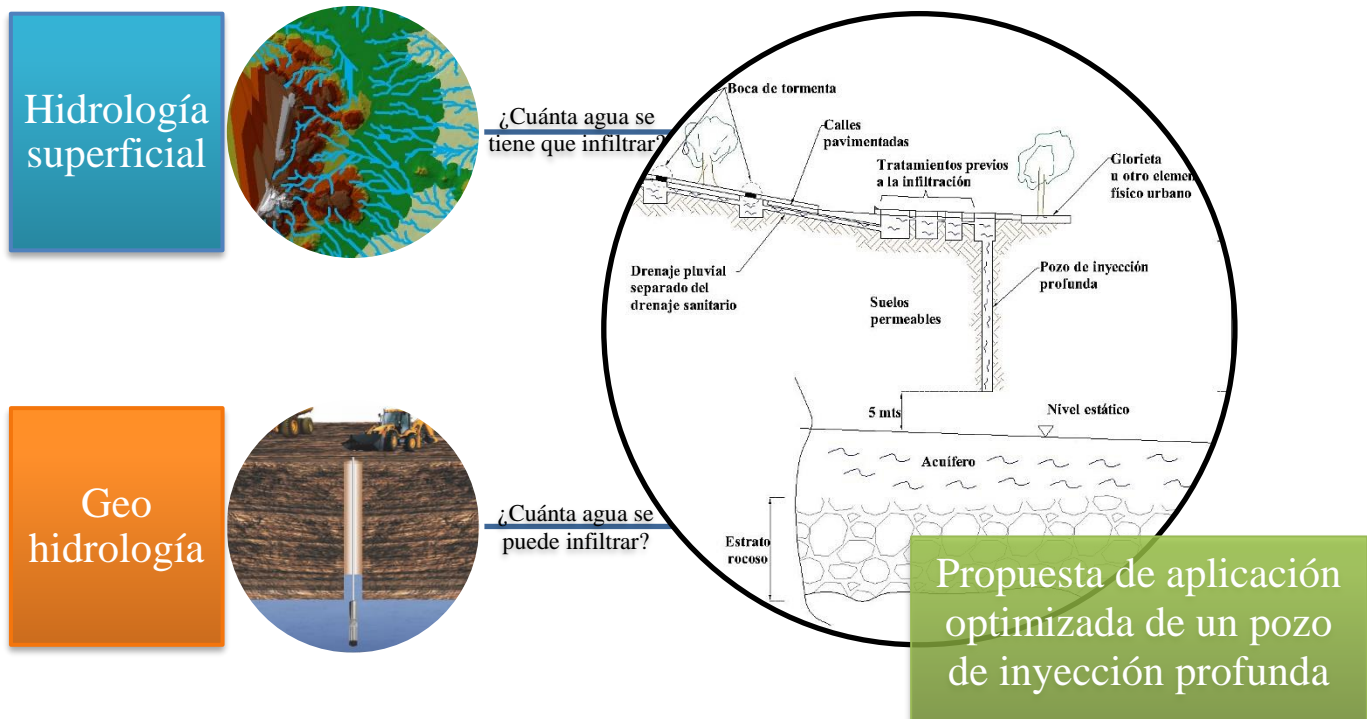


Figura 9. Esquema general del modelo operacional. Fuente: Elaboración propia.



Dentro de cada unidad de análisis hay observables definidos. Para estos observables se recabó información a partir de diferentes estrategias de recolección y así analizarla con diferentes métodos y obtener los productos requeridos para generar una propuesta de aplicación optimizada de un pozo de inyección profunda. En la tabla 1 se agrupan, por cada unidad de análisis, los observables, la estrategia de recolección, fuente, método de análisis y producto.

Unidades de análisis	Observables	Estrategia de recolección de información	Fuente	Método de análisis	Producto
Hidrología superficial	Acuíferos	Investigación documental	IMEPLAN	-Sistema de Información Geográfica -Método Racional -Metodo del Hidrograma Unitario Triangular	-Esguerrimientos -Microcuencas -Volumen de esguerrimientos
	Canales		IMEPLAN		
	Pozos de agua para uso urbano		IMEPLAN		
	Cauces		IMEPLAN		
	Cauces desaparecidos		IMEPLAN		
	Pendiente del terreno		IMEPLAN		
	Curvas de nivel a cada 10m		INEGI		
	Registro de inundaciones		SIAPA		
Geología	Profundidad del estrato rocoso	Investigación documental	Zamudio & Gómez (2016)	Hermenéutico	Estrato promedio y características físicas de los diferentes tipos de suelo de dicho estrato
	Estratigrafía		SPT provistos por profesionales		
	Coefficiente de permeabilidad		Zamudio, Vargas & Ochoa (2016)		
Pozo de inyección profunda	Datos geométricos  Estrato promedio y características físicas de los diferentes tipos de suelo de dicho estrato	Iterativo		Elemento finito	Capacidad de inyección de un pozo de inyección profunda

**Tabla 1. Unidades de análisis, observables y productos. Fuente: Elaboración propia**

## 2.2 Diseño de instrumentos y pruebas

Para obtener los escurrimientos y microcuencas se utiliza un álgebra de mapas. Esta herramienta del Sistema de Información Geográfica (SIG), nos permite hacer análisis geográficos. En este caso, a partir de las curvas de nivel y la pendiente del terreno es posible definir los escurrimientos, su dirección y por lo tanto las microcuencas correspondientes a cada escurrimiento. A partir de la definición de estos elementos, es posible realizar el cálculo del volumen de escurrimientos mediante diferentes métodos para obtener el caudal máximo asociado a determinada lluvia de diseño. SIAPA (2014) establece la utilización del **método racional** para la obtención del caudal pico.

El **método racional** considera que se tiene una lluvia uniforme durante un tiempo definido, llamado tiempo de concentración, en el que se tenga un caudal constante en la descarga de la cuenca (SIAPA, 2014). Este método se expresa con la ecuación 1:

$$Q_p = 0.278CiA \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$Q_p$ = Caudal pico ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$C$ = Coeficiente de escurrimiento, dado por la tabla 2 dependiendo del tipo de superficie

$i$ = Intensidad media de la lluvia para el tiempo de concentración de la cuenca ( $\text{mm/h}$ )

$A$ = Área de la cuenca ( $\text{km}^2$ )

0.278= Factor de conversión de unidades

TIPO DE ÁREA DRENADA	COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO (c)	
	MÍNIMO	MÁXIMO
<b>Zonas Comerciales:</b>		
Zona Comercial	0.75	0.95
Zonas mercantiles	0.70	0.90
Vecindarios	0.50	0.70
<b>Zonas Residenciales:</b>		
Unifamiliares	0.30	0.50
Multifamiliares, espaciados	0.40	0.60
Multifamiliares, compactos	0.60	0.75
Semiurbanas	0.25	0.40
Casas habitación	0.50	0.70
<b>Zonas Industriales:</b>		
Espaciado	0.50	0.80
Compacto	0.60	0.90
<b>Cementerios y parques</b>	0.10	0.25
<b>Campos de juego</b>	0.20	0.35
<b>Patios de ferrocarril y terrenos sin construir</b>	0.20	0.40
<b>Zonas urbanas</b>	0.10	0.30
<b>Calles:</b>		
Asfaltadas	0.70	0.95
De concreto hidráulico	0.80	0.95
Adoquinadas o empedradas, juntas con cemento	0.70	0.85
Adoquín sin juntar	0.50	0.70
Terracerías	0.25	0.60
<b>Estacionamientos</b>	0.75	0.85
<b>Techados impermeables</b>	0.75	0.95
Áreas boscosas (según pendiente y suelos)	0.10	0.20
<b>Praderas:</b>		
Suelos arenosos planos (pendientes $\leq 0.02$ )	0.05	0.10
Suelos arenosos con pendientes medias (0.02 – 0.07)	0.10	0.15
Suelos arenosos escarpados (0.07 ó más)	0.15	0.20
Suelos arcillosos planos (0.02 ó menos)	0.13	0.17
Suelos arcillosos con pendientes medias (0.02 – 0.07)	0.18	0.22
Suelos arcillosos escarpados (0.07 ó más)	0.25	0.35

Tabla 2. Coeficiente de escurrimiento para diferentes tipos de superficies. Fuente: SIAPA, 2014.

Así, es necesario calcular el tiempo de concentración de la cuenca para obtener la intensidad media de la lluvia ( $i$ ) en dicho tiempo. Para obtener este valor se suma el tiempo de concentración sobre la superficie ( $t_{cs}$ ) y el tiempo de traslado a través de los colectores ( $t_t$ ), sin embargo, al no tener información sobre los colectores solamente se tomará en cuenta el  $t_{cs}$ , para el cual se utilizará la fórmula propuesta por Kirpich (SIAPA, 2014):

$$t_{cs} = 0.0003245 \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{.77} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$t_{cs}$  = Tiempo de concentración sobre la superficie (h)

$L$  = Longitud del cauce principal (m)

$S$  = Pendiente media del cauce principal (decimal)

Además del  $t_{cs}$ , para obtener  $i$  es necesario definir un periodo de retorno. Para esto, SIAPA (2014) establece que para zonas centrales se utilice un periodo de 5 a 10 años, para zonas urbanas periféricas de 2 a 5 años y para zonas suburbanas y periféricas de 1 a 2 años. A partir de definir la zona de estudio se va a hacer la selección de dicho periodo según corresponda. Conociendo los valores de  $t_{cs}$  y del periodo de retorno, nos referimos a la tabla 3 donde se establecen intensidades para diferentes duraciones y periodos de retorno para la Subcuenca San Juan de Dios, dentro del AMG.

Tr(años)	i (mm/hr)													
	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	1440
2	152.1	113.8	79.4	63.0	53.1	46.3	41.3	37.5	34.5	32.0	29.9	28.1	26.5	2.7
5	200.8	150.3	104.8	83.1	70.0	61.1	54.6	49.5	45.5	42.2	39.4	37.1	35.0	3.4
10	237.6	177.8	124.0	98.3	82.9	72.3	64.6	58.6	53.8	49.9	46.7	43.9	41.4	3.8
15	259.1	193.9	135.2	107.3	90.4	78.9	70.4	63.9	58.7	54.5	50.9	47.8	45.2	4.0
20	274.4	205.3	143.2	113.6	95.7	83.5	74.6	67.7	62.2	57.7	53.9	50.6	47.9	4.2
25	286.2	214.2	149.4	118.5	99.8	87.1	77.8	70.6	64.9	60.2	56.2	52.8	49.9	4.4
50	323.0	241.8	168.6	133.7	112.7	98.3	87.8	79.7	73.2	67.9	63.4	59.6	56.3	4.7
100	359.8	269.3	187.8	149.0	125.5	109.5	97.8	88.8	81.5	75.6	70.7	66.4	62.8	5.0

**Tabla 3. Intensidad estimada para diferentes duraciones (minutos) y periodos de retorno (años). Fuente: (SIAPA & CEA, 2007)**

Para la simular la capacidad de infiltración de un pozo de inyección profunda promedio se utilizó un **modelo de elemento finito** realizado en la herramienta de análisis SEEP/W de la plataforma GEOSTUDIO. El método de elemento finito es un enfoque numérico para resolver problemas en donde las variables dependientes están asociadas ecuaciones diferenciales parciales que describen un proceso físico. El método de elemento finito implica los siguientes seis pasos generales (GEO-SLOPE, 2017):

1. Discretización del dominio en elementos finitos;
2. Selección de una función para describir como la variable principal cambia a través de un elemento;
3. Definición de una ecuación constitutiva;

4. Derivación de las ecuaciones:
5. Ensamblaje de las ecuaciones globales y la modificación de las condiciones de frontera;
6. Solucionar las ecuaciones globales.

De esta manera, al solucionar las ecuaciones globales, se tiene una descripción espacial y temporal de la variable principal a través del dominio. En este caso, el agua a través de un medio poroso no saturado que son los suelos. SEEP/W es una herramienta enfocada en la simulación el flujo de masa a través de este tipo de medios.

El primer paso en SEEP/W es definir el tipo de análisis, el cuál puede ser estático o transitorio. En el primero solamente se analiza para cuando no hay cambios en las condiciones de flujo en el tiempo y no con la variación del tiempo como es en el transitorio. Después, se define la visualización del modelo, que puede ser en una dimensión, bidimensional o axisimétrico. Axisimétrico se refiere a que el plano dibujado en el modelo es simétrico alrededor de un eje. En este caso se optó por un análisis transitorio y axisimétrico. Una vez definido el tipo de análisis se requiere generar la geometría del modelo, en la que se incluyó el PET. Así, se definen los materiales y el tipo de materiales, ya que pueden ser suelos saturados o saturados/no saturados. Por la naturaleza del proyecto es necesario conocer los cambios en la permeabilidad y en el flujo del agua en los suelos por lo que se eligieron suelos saturados/no saturados. Las características de los suelos necesarias para poder dar solución a un problema de flujo a través de ellos son 4: la función de conductividad hidráulica, la función de contenido volumétrico de agua, la proporción de anisotropía y el ángulo de rotación.

SEEP/W tiene distintos métodos para estimar la función de contenido volumétrico de agua. En este caso se utilizó la propuesta por Van Genuchten (1980), que se define con la ecuación 3:

$$\theta_w = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{[1 + (\alpha' \varphi)^n]^m} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$\alpha'$ ,  $n$ ,  $m$  = parámetros de ajuste de las curvas que controlan la forma de la función

$\varphi$  = Succión mátrica (kPa)

$\theta_{sat}$  = Contenido volumétrico de agua en estado saturado

$\theta_{res}$  = Contenido volumétrico de agua residual

El programa tiene funciones ejemplo disponibles para diferentes tipos de suelo, desde arcillas hasta gravas y son generadas a partir de la ecuación 3.

Así mismo, para la estimación de la función de conductividad hidráulica la ecuación 4 propuesta también por Van Genuchten (1980) en la que también se utilizan los parámetros  $\alpha'$ ,  $n$ ,  $m$  utilizados en la ecuación 3 y el valor para la conductividad hidráulica en estado saturado del suelo ( $K_{sat}$ ):

$$Kw(\varphi) = Ksat \frac{\{1-(\alpha'\varphi)^{n-1}[1+(\alpha'\varphi)^n]^{-m}\}^2}{[1+(\alpha'\varphi)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

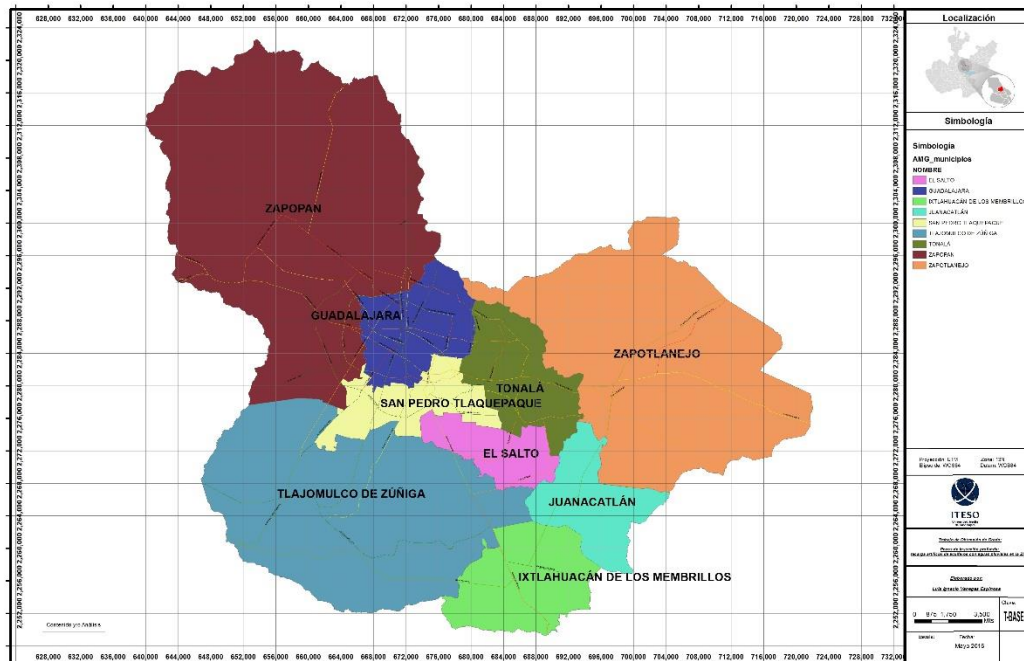
Por último, se definen las condiciones de frontera. En este caso se definió una función de carga total vs tiempo en donde se estableció una carga (H) específica en todo el pozo de inyección profunda.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Descripción de resultados

##### 3.1.1 Definición de zona de estudio y sus características

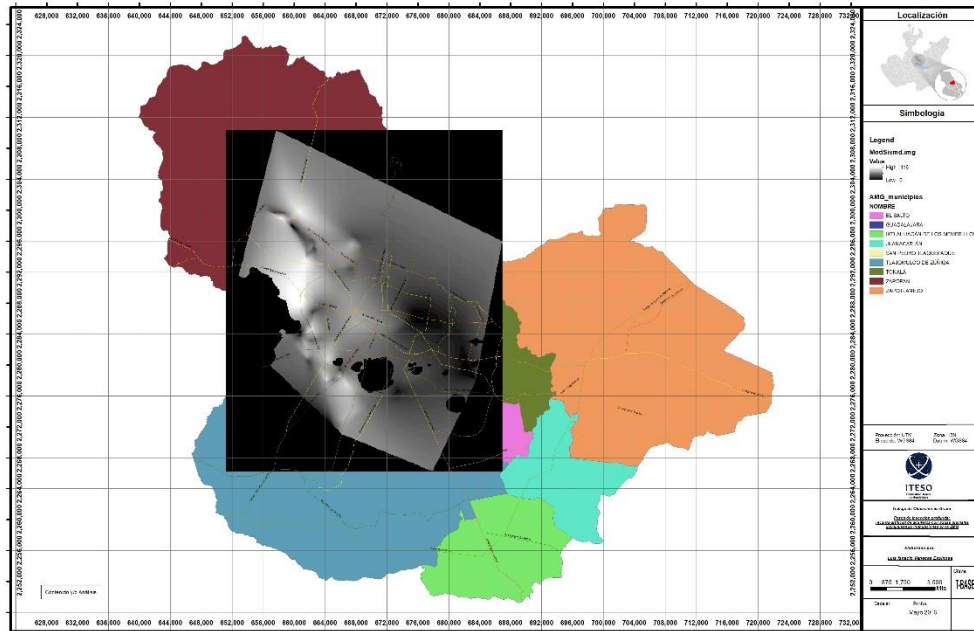
A partir de los observables de la hidrología superficial, se generaron diferentes mapas para poder definir un área de estudio con las características más propicias posibles para la colocación de un pozo de inyección profunda para la recarga artificial de acuíferos. El primer mapa generado es el del Área Metropolitana de Guadalajara, donde se observan los 9 municipios que la forman y las principales vías de comunicación terrestre del AMG.



**Mapa 1. Municipios del AMG y principales vías de comunicación terrestre.**

Un factor decisivo para la elección de la zona de estudio es el conocimiento de la profundidad de la roca. Es necesario conocer este dato debido a que no se puede infiltrar agua en un estrato como éste a menos que se encuentre muy fracturado. Además, el costo de la perforación aumenta considerablemente. Saborio (1995) describe que desde la parte sur-poniente (periférico sur y López Mateos) hasta Av. Alcalde y Circunvalación, se encuentra a más de 50m bajo tierra. Zamudio & Gómez (2016) generaron un nuevo modelo de profundidad de

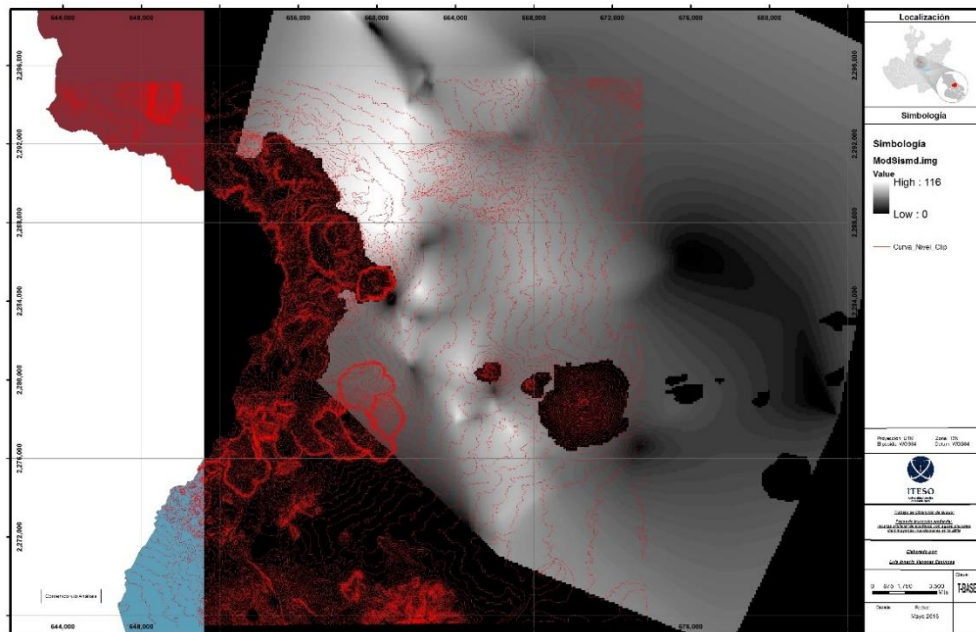
los depósitos de suelo del AMG, donde se utilizó la información de 78 sondeos de exploración profunda realizados por el SIAPA. Así, en el mapa 2 se agregó el mapa de bits que contiene la profundidad de la roca producto de dicho estudio. En este mapa de bits los colores claros corresponden a una mayor profundidad de la roca, por lo que se observa que la profundidad el estrato rocoso aumenta hacia el oeste del AMG.



**Mapa 2. Profundidad del estrato rocoso. Fuente: Elaboración propia basada en Zamudio & Gómez (2016).**

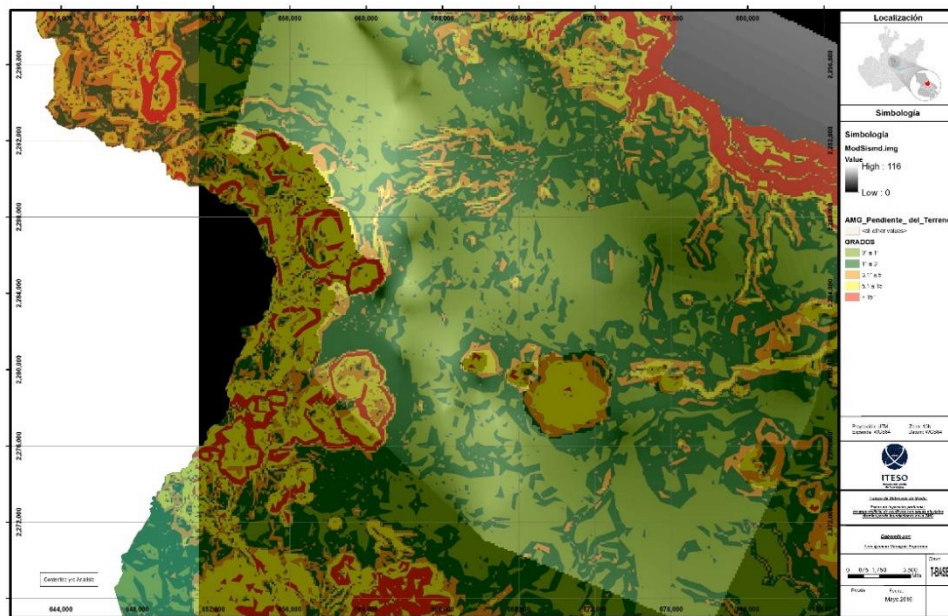
Así, se comienza a hacer un álgebra de mapas al poniente de la ciudad. En el mapa 3 se incluyeron las curvas de nivel a cada 10 metros. Con, las curvas de nivel es posible definir escurrimientos y, por lo tanto, microcuencas. Es importante mencionar los puntos altos de la zona ya que van a marcar la separación de las subcuencas: al oeste La Primavera, al sur-este se encuentran los cerros de Santa Lucía, El Tesoro y Del Cuatro. Estos puntos altos coinciden con un estrato rocoso somero.





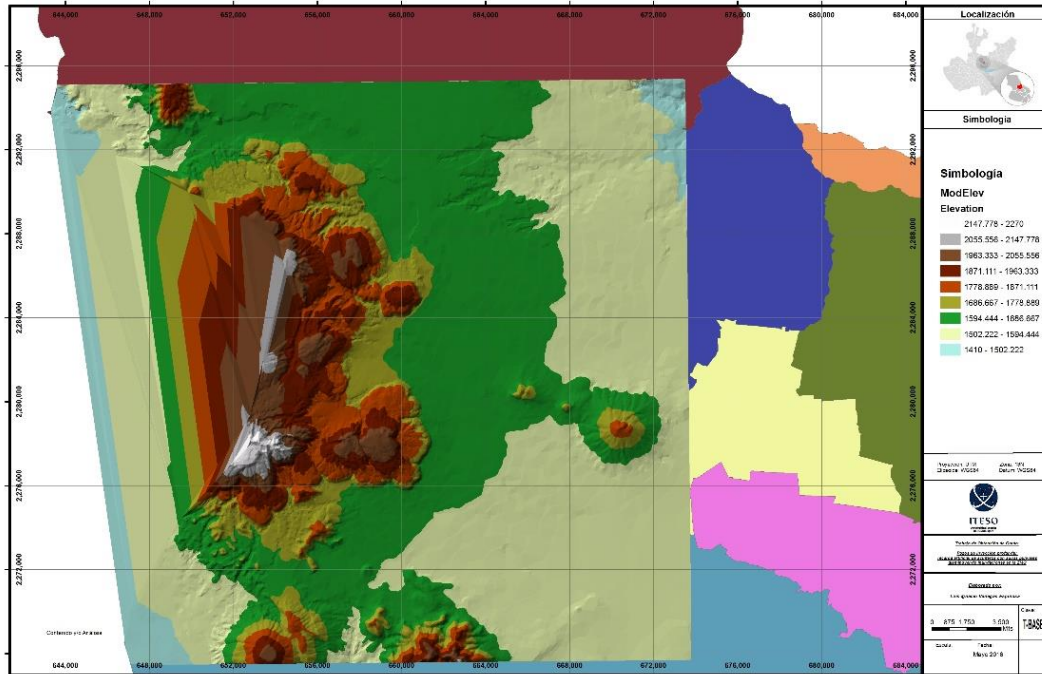
**Mapa 3. Curvas de nivel en zona poniente de la ciudad. Fuente: Elaboración propia**

Después se observaron las pendientes del terreno, donde se observa que la pendiente más predominante es de  $0^\circ$  a  $1^\circ$  ( $1.75\%$ ) representada en color verde claro. La dirección de las pendientes es de oeste a este, por lo que los escurrimientos se esperan que sean en esa dirección. Un terreno plano como en este caso es muy bueno para la infiltración, ya que en terrenos con pendientes mayores los escurrimientos son mayores y con menos posibilidad de infiltrarse (Chowdhury, *et al.*, 2010). Así mismo, al tener precipitaciones en un terreno plano e impermeabilizado, como es el caso del AMG, es más propenso a encharcamientos e inundaciones.

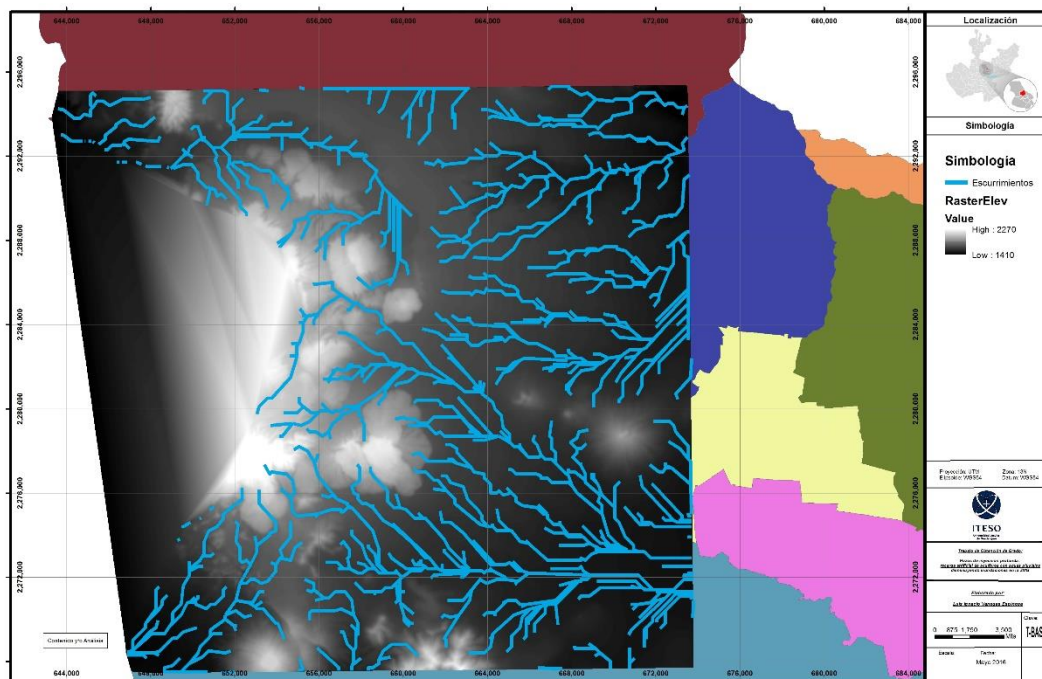


**Mapa 4. Pendientes de terreno en zona poniente de la ciudad. Fuente: Elaboración propia**

El mapa 5 es un Modelo Digital de Elevación (MDE) generado a partir de las curvas de nivel. Un MDE es una representación visual y numérica que posibilita la caracterización de las formas del relieve (INEGI, 2014). En este caso permite generar una imagen mapa de bits con las alturas del terreno y un mapa de escurrimientos.



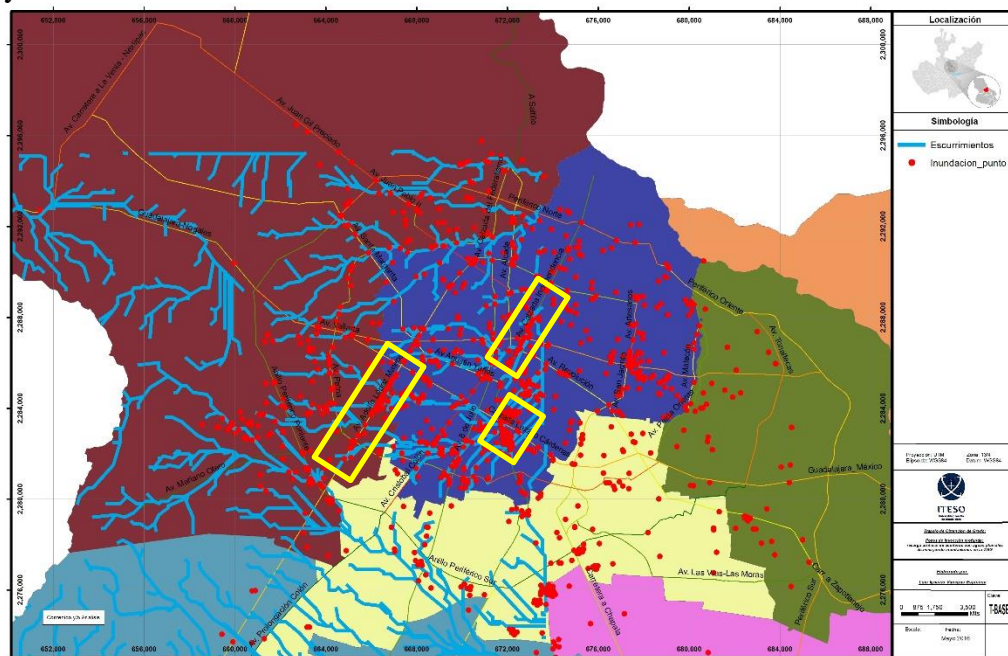
**Mapa 5. Modelo Digital de Elevación. Fuente: Elaboración propia**



**Mapa 6. Imagen mapa de bits con alturas del terreno y escurrimientos en el poniente del AMG. Fuente: Elaboración propia**



Una vez observados los escurrimientos, se colocaron los puntos que representan inundaciones documentadas. En este mapa podemos observar que las zonas con más reportes de inundaciones son tres: el cruce de Av. Mariano Otero y Av. López Mateos, en la zona de plaza del sol; la zona del parque de La Liberación por Calzada Lázaro Cárdenas; por último, en la zona centro de la ciudad en la Calzada Independencia en sus cruces con Av. Revolución y Av. Juárez. Además, se observa que todos los puntos de inundación corresponden a un escurrimiento. Cabe mencionar que el hecho de que la infraestructura sea insuficiente responde en gran medida a que fue calculada para otros coeficientes de escurrimiento, esto quiere decir que las obras de drenaje pluvial se calcularon contemplando suelos agrícolas o no urbanizados que tienen coeficientes de escurrimiento menores a los existentes actualmente, donde la gran mayoría de la superficie se encuentra impermeabilizada por las calles y edificaciones a causa del crecimiento acelerado de la ciudad en las últimas décadas.

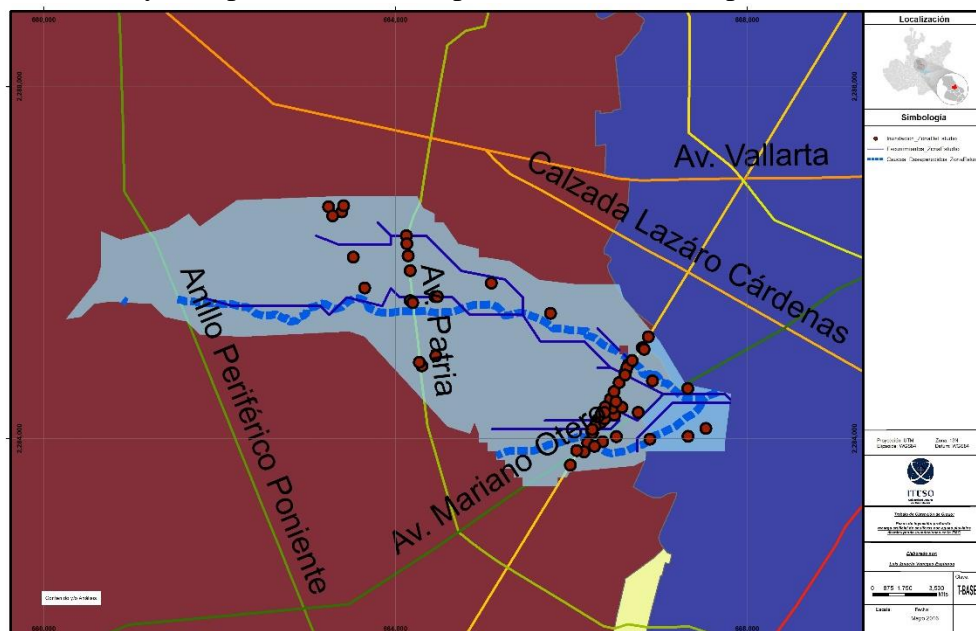


**Mapa 7. Esgurrimientos y puntos de inundación en el AMG.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Para definir un área de estudio hidrológica conviene la definición de microcuencas. En el siguiente mapa se observan polígonos de diferentes colores que representan a las diferentes microcuencas generadas a partir de las elevaciones y que corresponden a los escurrimientos. Se observa que algunos escurrimientos llegan al cruce de Av. Mariano Otero con Av. López Mateos, una de las zonas de inundación observadas en el mapa 7. Con esta imagen se hace una selección previa de zona de estudio que cumple con un estrato rocoso profundo, poca pendiente, escurrimientos y zonas de inundación.



A partir del mapa 9 se observa que las microcuencas que generan los escurrimientos que abonan a las inundaciones en el cruce de la av. López Mateos y av. Mariano Otero son 6. A partir de este punto se genera un área de estudio que comprende a estas 6 microcuencas y se empiezan a analizar distintos factores. La **profundidad de la roca** en la zona comprendida entre el Anillo Periférico Poniente y Av. Patria va **desde 75 hasta 40 metros**. Esta profundidad coincide con la parte alta de las microcuencas, donde **la cota más alta** (cercana al Anillo Periférico Poniente) es **1894m.s.n.m.**; cerca de av. Patria está **la cota intermedia** que es igual **1630m.s.n.m.** y cercana al cruce de las av. López Mateos y Mariano Otero está la **cota más baja** que equivale a **1590m.s.n.m.** y donde la profundidad de la roca continúa en 40 metros. La **pendiente**, con dirección de oeste a este, en esas microcuencas va de **0° a 1°** lo que es benéfico para procesos de infiltración. En la base de datos del SIAPA se reportan **60 casos de inundación** entre 1985 y 2006 en la zona que comprenden estas microcuencas, donde las alturas que alcanzó el agua en dichos eventos van desde 0.30m hasta 1.5m sobre el nivel de calle. Por último, se analiza la capa de “Cauces desaparecidos” provista por el Instituto Metropolitano de Planeación del AMG (IMEPLAN). Dicha capa agrupa información de cauces identificados mediante fotografías aéreas del INEGI realizadas en diferentes años del siglo XX. En esta capa se observa que en esta microcuenca es donde se generaba el arroyo del Chicalote, coincidiendo con los escurrimientos encontrados a partir del álgebra de mapas realizado en el SIG. A partir de esto se nombrará a la zona de estudio como “**microcuenca del Chicalote**” para las siguientes referencias. En el mapa 10 se observa la microcuenca del Chicalote, las inundaciones en dicha zona, los escurrimientos generados a partir del álgebra de mapas (línea azul sólida) y la capa de cauces desaparecidos (línea azul punteada).

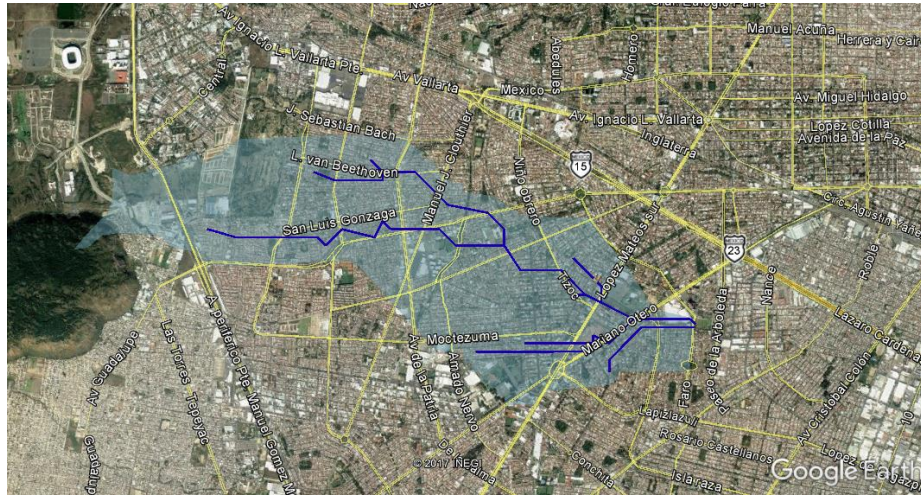


**Mapa 10. Microcuenca del Chicalote, inundaciones, escurrimientos y cauces desaparecidos.**

**Fuente: Elaboración propia.**



En el mapa 11, se observa que la **superficie** de la microcuenca del Chicalote es principalmente del tipo **residencial con casas habitación**, sin embargo, hay diferentes áreas verdes como son el parque Metropolitano, parque Mendelssohn, parque Arcos de Guadalupe, parque Ciudad de los niños, parque José Guadalupe Zuno Hernández, el Parque Mirador del Sol, el área verde del salón de eventos Trasloma, el área verde de la Universidad del Valle de Atemajac (UNIVA) y un área verde contigua al periférico colindando con la colonia Ciudad Granja. A partir de identificar estos dos tipos de superficies predominantes, se obtienen las áreas para poder definir un coeficiente de escurrimiento ponderado estimado.



**Mapa 11. Tipos de superficies en microcuenca del Chicalote y escurrimientos.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

El **área total** de la microcuenca del chicalote es igual a **11.569 km<sup>2</sup>**

El área correspondiente a los **parques y áreas verdes** es igual a **1.28 km<sup>2</sup>**

Por lo tanto, el área correspondiente a **casas habitación** es igual a **10.289 km<sup>2</sup>**

Con fines de simplificar la obtención de áreas, en este estudio no se tomará en cuenta la diferencia entre los coeficientes de escurrimiento entre calles y casas habitación, ya que el valor máximo de escurrimiento de casas habitación coincide con el valor mínimo de las calles. Para obtener un coeficiente de escurrimiento ponderado se utilizará la ecuación 5:

$$C_{ponderado} = \frac{\sum(Ci * Ai)}{\sum Ai} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Donde:

$Ci$ = Coeficiente parcial correspondiente a cada superficie

$Ai$ = Área parcial correspondiente a cada superficie

De la tabla 2 se obtienen los valores de  $C_i$ :

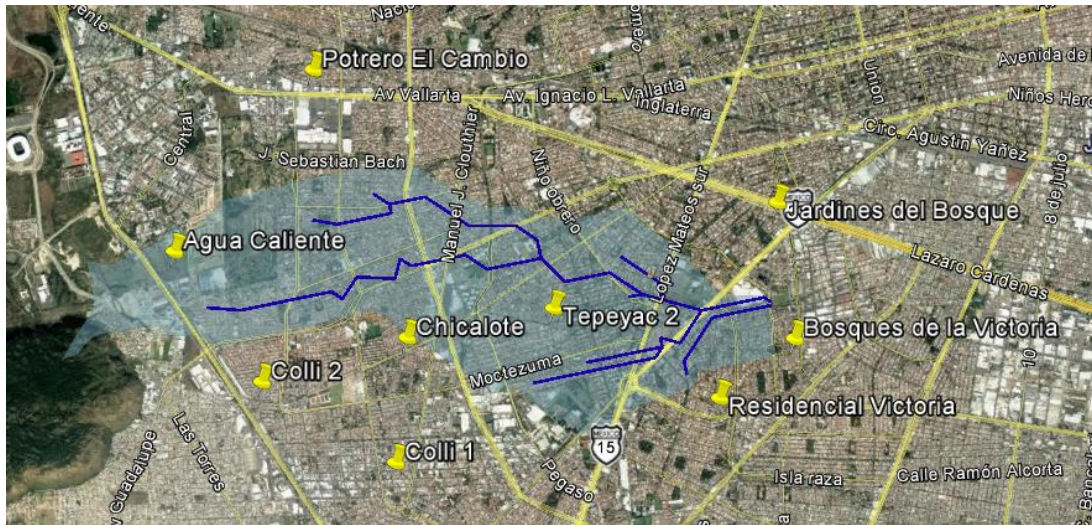
Para casa habitación es igual a 0.70, para parques es igual a 0.25. Con estos valores se hacen las operaciones:

Tipo de superficie	Área (km <sup>2</sup> )	$C_i$	$C_i \times A_i$ (km <sup>2</sup> )
Casa habitación	10.289	0.70	7.2023
Parques	1.28	0.25	0.32
Totales	11.569	-	7.5223

Por lo tanto, el  $C_{ponderado}$  es igual a:

$$C_{ponderado} = \frac{7.5223 \text{ km}^2}{11.569 \text{ km}^2} = 0.65$$

Para identificar los niveles estáticos y dinámicos del agua subterránea de la zona de estudio se agruparon los datos de dos fuentes de información: la resolución 4284217 enviada por el SIAPA el 9 de octubre del 2017 a través del portal del Instituto de Transparencia, Información Pública y Protección de Datos Personales (ITEI) y el Estudio de actualización geohidrológica integral de las cuencas Atemajac-Toluquilla, Estado de Jalisco, México, realizado por GEOEX (2004). En el mapa 12 se identifican los pozos que están dentro de la microcuenca del Chicalote o muy cercanos a ella y de los cuales se tienen datos del nivel estático y/o dinámico. Así mismo, en la tabla 4 se organizan los datos de niveles estáticos y dinámicos, así como la profundidad total perforada de cada pozo. En esta tabla se observa que el promedio de nivel estático medido en 2003 es mayor al medido en agosto de 2017, es decir, el nivel estático en el 2003 estaba más profundo. Sin embargo, al revisar los datos de agosto de 2017, se observa que los datos del nivel estático con menor valor coinciden con los casos en los que la diferencia entre nivel dinámico y nivel estático es de más de 100m en promedio. Por esto, como se comentó anteriormente se interpreta que el nivel estático corresponde a volúmenes de agua que se infiltraron durante las precipitaciones del temporal y que no es realmente el nivel superior del acuífero. Siendo así el nivel dinámico el más aproximado al nivel superior del acuífero.



**Mapa 12. Pozos dentro y cercanos a la microcuenca del Chicalote.**

**Fuente: Elaboración propia a partir de GEOEX (2004).**

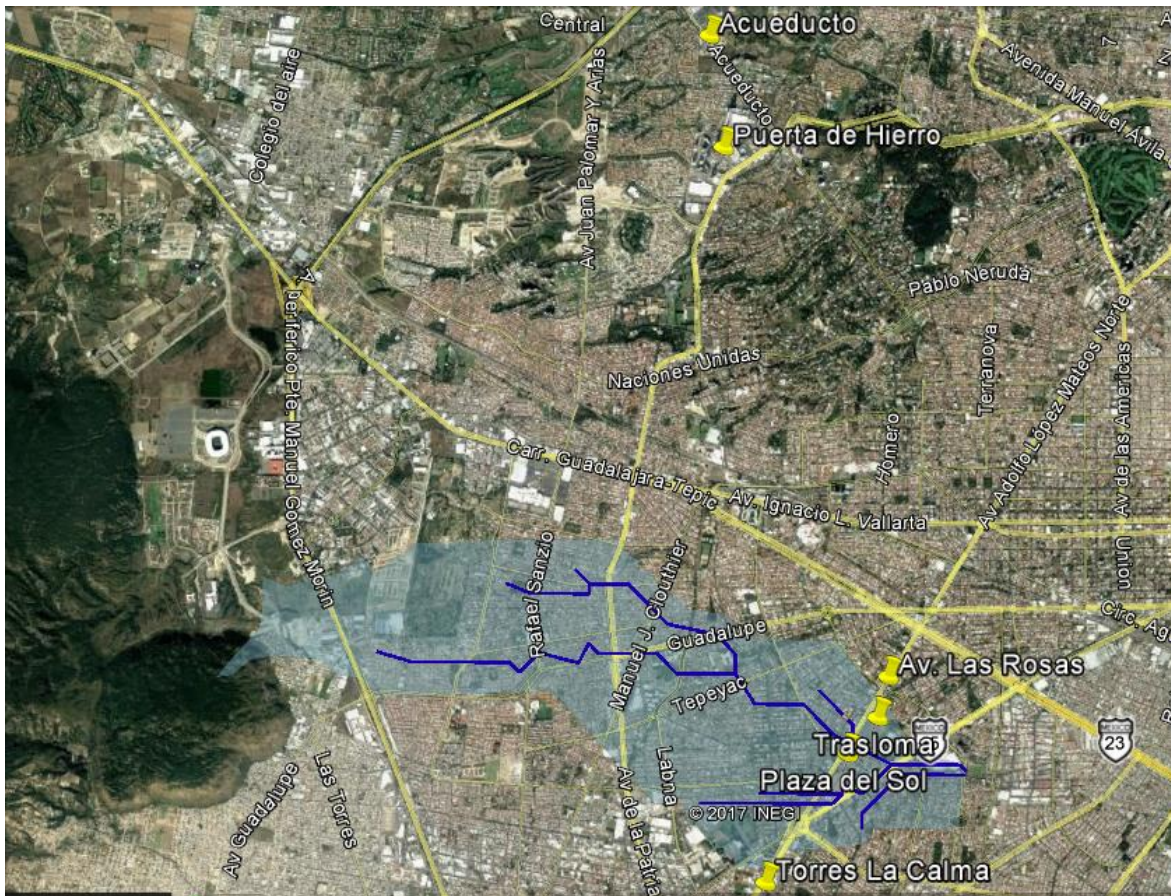
POZO	Niveles 2003		Niveles agosto 2017		Profundidad total perforada (m)
	Nivel estático (m)	Nivel Dinámico (m)	Nivel estático (m)	Nivel Dinámico (m)	
Agua Caliente	118	Sin información	Sin información	Sin información	250
Bosques de la Victoria	66.55	77.4	26	143	68
Colli 1	63.9	110	Sin información	Sin información	300
Colli 2	76	Sin información	Sin información	Sin información	300
Chicalote	66.42	Sin información	Sin información	Sin información	Sin información
Inglaterra	86.86	96.65	86.86	97	247
Jardines del Bosque	30	Sin información	22	113	200
Potrero El Cambio	90	139	85	28	270
Residencial Victoria	34.1	Sin información	34	150	96
Tepeyac 2	63.09	104	63	52	250
<b>Promedios</b>	<b>69.49</b>	<b>105.41</b>	<b>52.81</b>	<b>97.17</b>	

**Tabla 4. Niveles estáticos, dinámicos y profundidad total perforada de pozos en la microcuenca del Chicalote y alrededores.**

**Fuente: Elaboración propia a partir de SIAPA (2017) y GEOEX (2004)**



Para conocer la estratigrafía de la zona se acudió a diferentes ingenieros profesionales en geotecnia y mecánica de suelos para recabar información de Sondeos de Penetración Estándar (SPT) realizados en la microcuenca del Chicalote y alrededores. Se obtuvieron los datos resultados de 38 SPT de los cuales se purgó la información dependiendo la profundidad a la que llegó cada sondeo y su ubicación. Finalmente, en la tabla 5 se agruparon los resultados de 19 sondeos realizados en las siguientes ubicaciones: Av. Acueducto, centro comercial Plaza del Sol, salón de eventos Trasloma, centro comercial Puerta de Hierro, Av. Las Rosas y Torres La Calma. A partir de dicha tabla se tomó PET para la microcuenca del Chicalote representado en la tabla 6.



**Mapa 13. Ubicación de SPT utilizados para obtener estrato promedio.**

**Fuente: Elaboración propia.**

Laboratorio:	Exploraciones Geotecnia de Occidente, S.A. de C.V.	EIC S.A. de C.V.	Seismocontrol, S.A. de C.V.	Sandstorm GAM	Sandstorm GAM	Centro de Investigación Para el Desarrollo Industrial	
Ubicación:	Av. Acueducto	Plaza del Sol	Trasloma	Puerta de Hierro	Av. Las Rosas	Torres La Calma	
Profundidad (m)	Tipo de suelo (SUCS)	Tipo de suelo (SUCS)	Tipo de suelo (SUCS)	Tipo de suelo (SUCS)	Tipo de suelo (SUCS)	Tipo de suelo (SUCS)	
0 a 6							
6 a 12							
12 a 18							
18 a 24			TOBA PUMÍTICA				
24 a 30			TOBA PUMÍTICA				
30 a 36							
36 a 42							
42 a 48							
48 a 54						Tipo de suelo (SUCS)	Simbología
54 a 60				BASALTO		SM	
						SP	

Tabla 5. Estratigrafía de las diferentes ubicaciones de SPT.  
Fuente: Elaboración propia.



En la tabla 5 se hace la clasificación de los suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Se observa que el tipo de suelo predominante es el tipo SM, el cual se refiere a arenas limosas, es decir, mezclas de arenas y limos. Así mismo también se observa un tipo de suelo clasificado como arenas mal graduadas (SP) que se refiere a que en la composición de dicha arena predomina un tamaño o tipo de tamaños granulares, con ausencia de algunos tamaños intermedios. En el caso del estudio realizado en Trasloma, la roca se encuentra a partir de los 18 metros de profundidad, así como en Puerta de Hierro está a partir de los 55m de profundidad. También es importante señalar que la mayoría de los estudios coinciden con la ubicación del tipo de suelo SM y su predominación ante otros tipos de suelos. Por último, el estudio que alcanzó mayor profundidad es el de Puerta de Hierro, el cual no se encuentra en la microcuenca del Chicalote pero se encuentra en las partes altas de la zona poniente del AMG. Tomando en cuenta estos factores se define el PET para la modelación del pozo de inyección profunda.

Profundidad (m)	Tipo de suelo (SUCS)	Tipo de suelo (SUCS)	Simbología
0 a 6		SM	
6 a 12		SP	
12 a 18			
18 a 24			
24 a 30			
30 a 36			
36 a 42			
42 a 48			
48 a 54			
54 a 60			

Tabla 6. Perfil Estratigráfico Tipo (PET). Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se le adjudican valores de **permeabilidad (K)** a cada estrato. Los valores de permeabilidad de los suelos se obtuvieron de las pruebas realizadas a los suelos característicos de la región por Zamudio, Vargas & Ochoa (2016). Sanders (1998) establece un rango de permeabilidad para rocas cristalinas, dentro de estas el basalto inalterado. Así, los valores de permeabilidad para cada estrato se agrupan en la tabla 7.

Estrato	Valor de permeabilidad, K (m/s)
SP	$2.7 \times 10^{-3}$
SM	$8.0 \times 10^{-4}$
Basalto	$1.16 \times 10^{-8}$

**Tabla 7. Valores de permeabilidad para tipos de suelo y basalto.**

**Fuente:** Elaboración propia a partir de Zamudio, Vargas & Ochoa (2016) y Sanders (1998)

Como parte de la identificación de la microcuenca del Chicalote, se realizó una **observación directa** el día 13 de noviembre de 2016, se identificaron elementos de la zona de estudio como algunos parteaguas que delimitan las microcuencas analizadas en el SIG, camellones, canal de aguas pluviales existente y bocas de tormenta. Debido a que ese día se encontraba lloviendo, también se observaron contaminantes en las aguas pluviales. Los camellones eran de sección variable entre 4.80m y 1.50m. Las bocas de tormenta se observaron transversales a las calles y de 80cm de espesor.



**Figura 11. Camellones de sección variable en Av. Guadalupe.**



Figura 12. Canal en calle Santa Catalina de Siena.



Figura 13. Aceites en aguas pluviales.



Figura 14. Boca de tormenta.

### 3.1.2 Cálculo del caudal máximo

Para poder calcular el caudal máximo con el método racional es necesario conocer  $C$ ,  $i$  y  $A$ . El valor de  $C$  obtenido anteriormente es igual a 0.65, así como el área  $A$  de la cuenca es  $11.569 \text{ km}^2$ . Así, solamente falta conocer el valor de la intensidad media de la lluvia ( $i$ ). Para esto es necesario establecer el tiempo de concentración de la cuenca con la ecuación de Kirpich (ecuación 2). Para conocer el tiempo de concentración de la cuenca ( $t_{cs}$ ) es necesario conocer la longitud y pendiente media de su cauce principal. La longitud del cauce se obtiene directamente del SIG. La pendiente se calcula con la cota máxima y mínima de la cuenca de la siguiente manera:

$$L = 6,790\text{m}$$

$$S = \frac{\text{Cota máxima} - \text{Cota mínima}}{L} \therefore = \frac{1,894\text{m} - 1,590\text{m}}{6,790\text{m}} = .0447 \text{ m/m}$$

Por lo tanto, el  $t_{cs}$  es igual a:

$$t_{cs} = 0.0003245 \left( \frac{6,790m}{\sqrt{.0447m/m}} \right)^{.77} = \mathbf{0.958 h}$$

Que en minutos el valor de  $t_{cs}$  es igual a **57.48 min.** Con estos datos solamente falta definir el periodo de retorno. Como se mencionó anteriormente, el periodo de retorno depende del tipo de zona que se esté analizando, es decir, si es zona central, urbana periférica o suburbana y periférica. Ante la falta de más criterios para establecer qué tipo de zona es, se define que por el alto nivel de urbanización se podría considerar zona central, sin embargo, al estar muy cercana a la periferia también entraría en la categoría de zona urbana periférica. Por esto, se utilizará un **periodo de retorno de 5 años**, ya que es el valor máximo en el caso de una zona urbana periférica y es el valor mínimo para una zona central.

De la tabla 3 se extraen los siguientes valores para un periodo de retorno de 5 años:

Tr (años)	50 min	60 min
5	61.1 mm/h	54.6 mm/h

Con estos datos, se hace una interpolación para conocer el valor de  $i$  en el  $t_{cs}$  el cual es igual a **56.238 mm/h.**

Con estos valores se calcula el caudal máximo con el método racional de la siguiente manera:

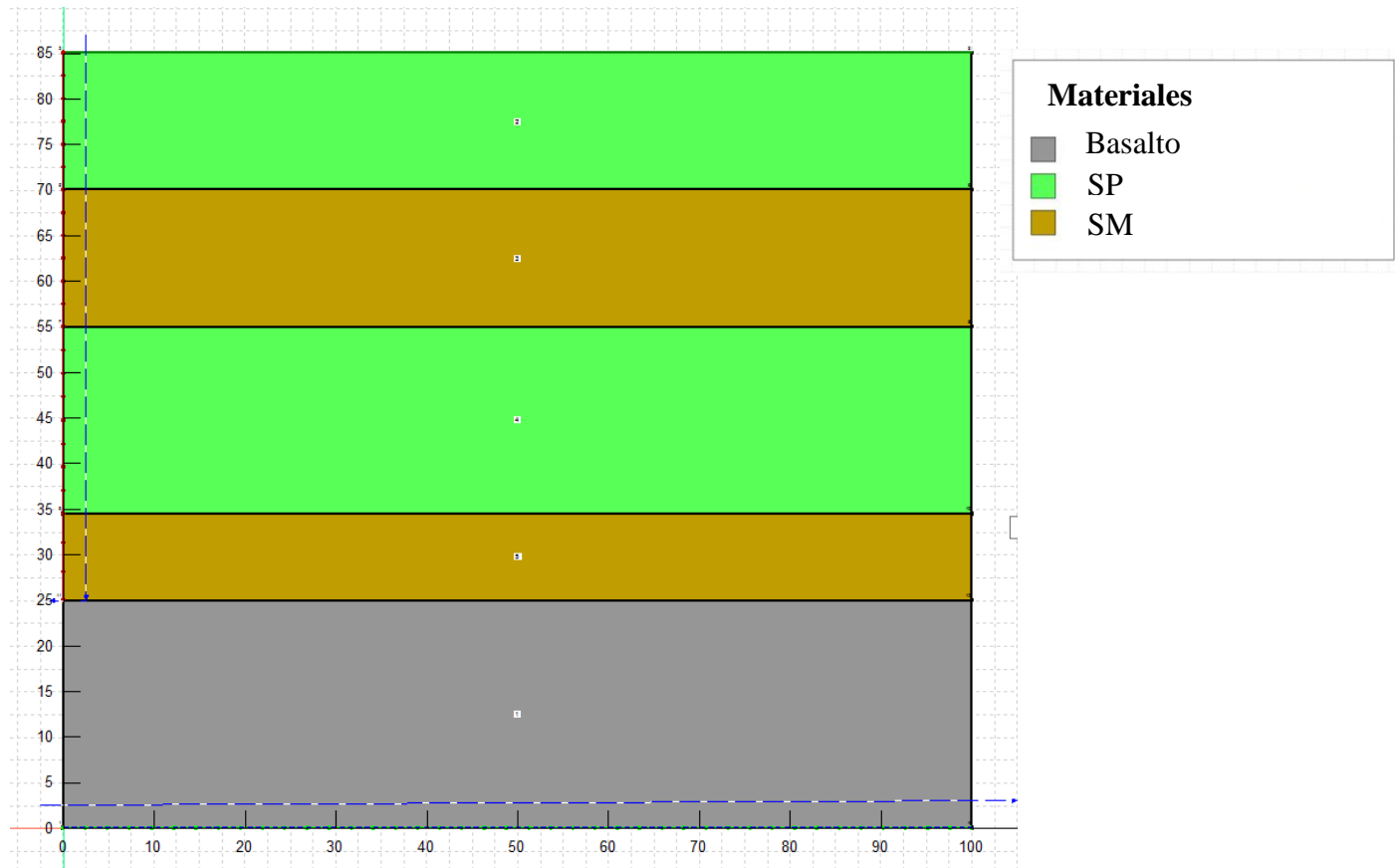
$$Q_p = 0.278 * 0.65 * 56.238mm/h * 11.569km^2 = \mathbf{117.57m^3/s}$$

Esto indica que en la microcuenca del chicalote en 57.48 minutos se tendrá un caudal máximo de 117,570 l/s para una precipitación igual a 56.23 mm/h.



### 3.1.3 Resultados del modelado de infiltración

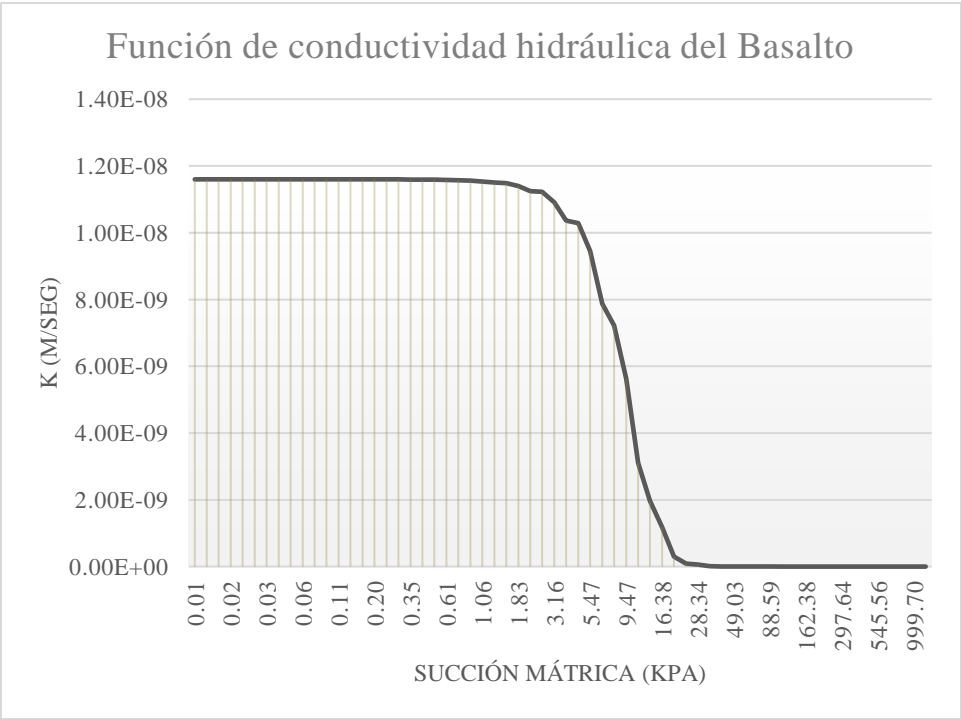
En la figura 15 se observa la geometría utilizada en el modelado en el programa SEEP/W, donde el eje “y” corresponde al PET establecido anteriormente y la dimensión en el eje “x” se definió arbitrariamente igual a 100m. El pozo se dimensionó de 60m de profundidad, de la cota 85m a 25m y al ser un análisis axisimétrico tiene un diámetro unitario (1m).



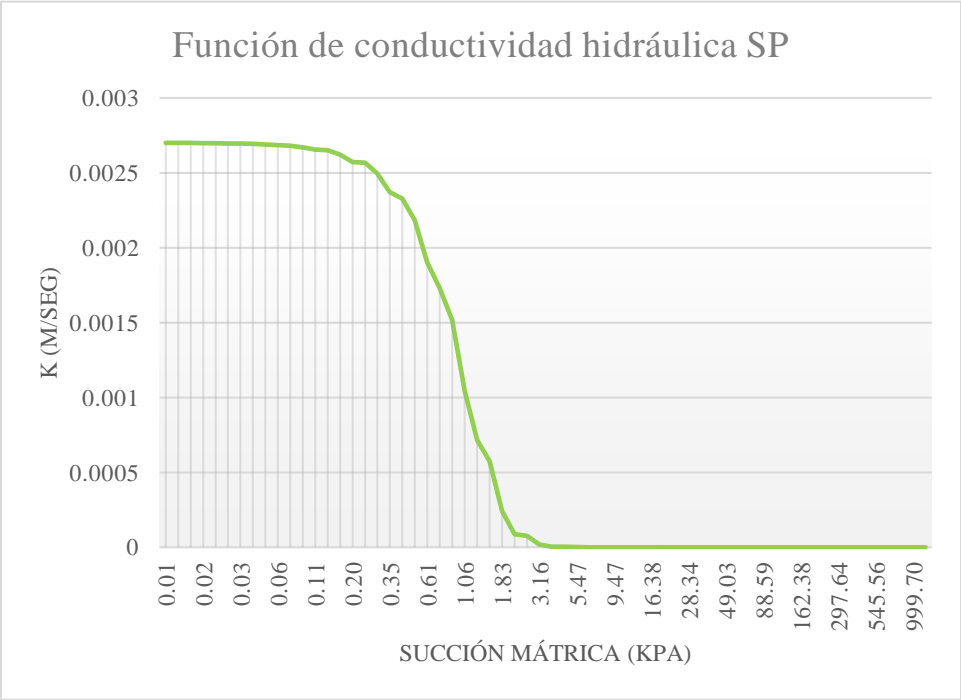
**Figura 15. Geometría en SEEP/W. Fuente: Elaboración propia.**

Siguiendo con el procedimiento de análisis en el SEEP/W, se establecieron las características de los suelos. Se suponen materiales isotrópicos -que poseen las mismas propiedades físicas en todas las direcciones. Después, se definen las funciones para los dos tipos de suelo y el basalto según las características definidas anteriormente. En las gráficas 1, 2 y 3 se observan las funciones de conductividad hidráulica de los materiales, en la gráfica 4 se hace un comparativo entre las funciones de SP y SM. Se observa que a mayor succión mátrica el valor de K disminuye hasta tener un valor igual a cero.

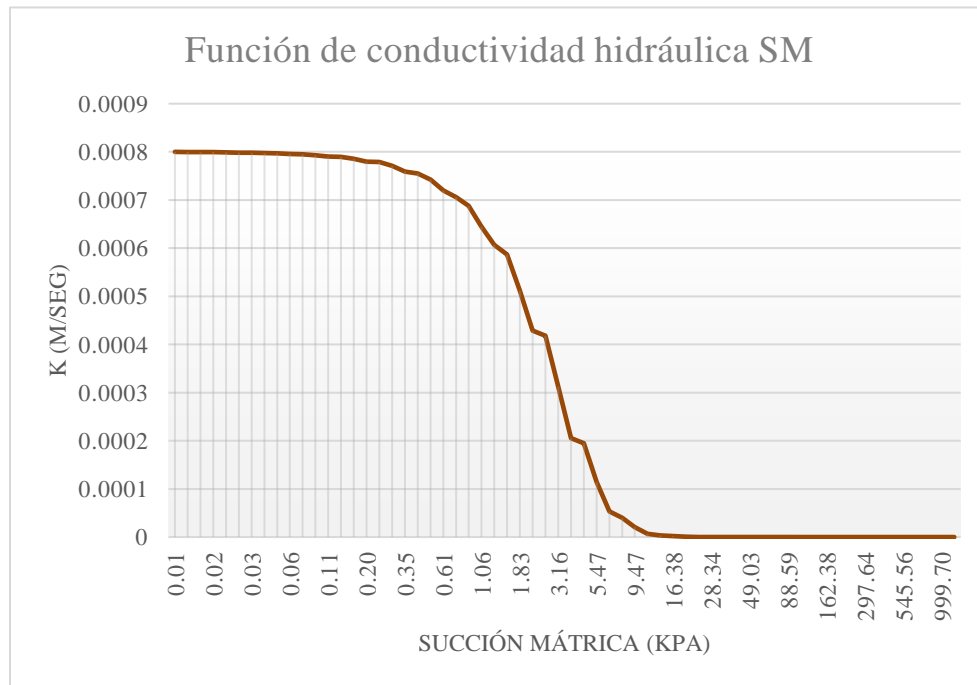




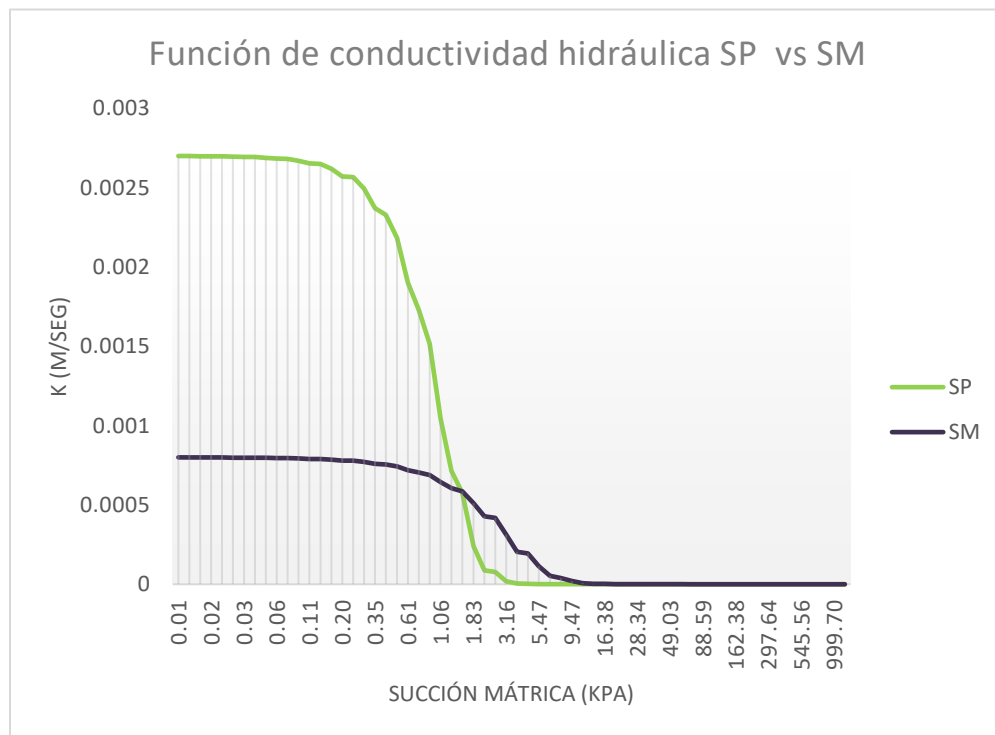
**Gráfica 1. Función conductividad hidráulica del basalto. Fuente: Elaboración propia.**



**Gráfica 2. Función conductividad hidráulica de SP. Fuente: Elaboración propia.**

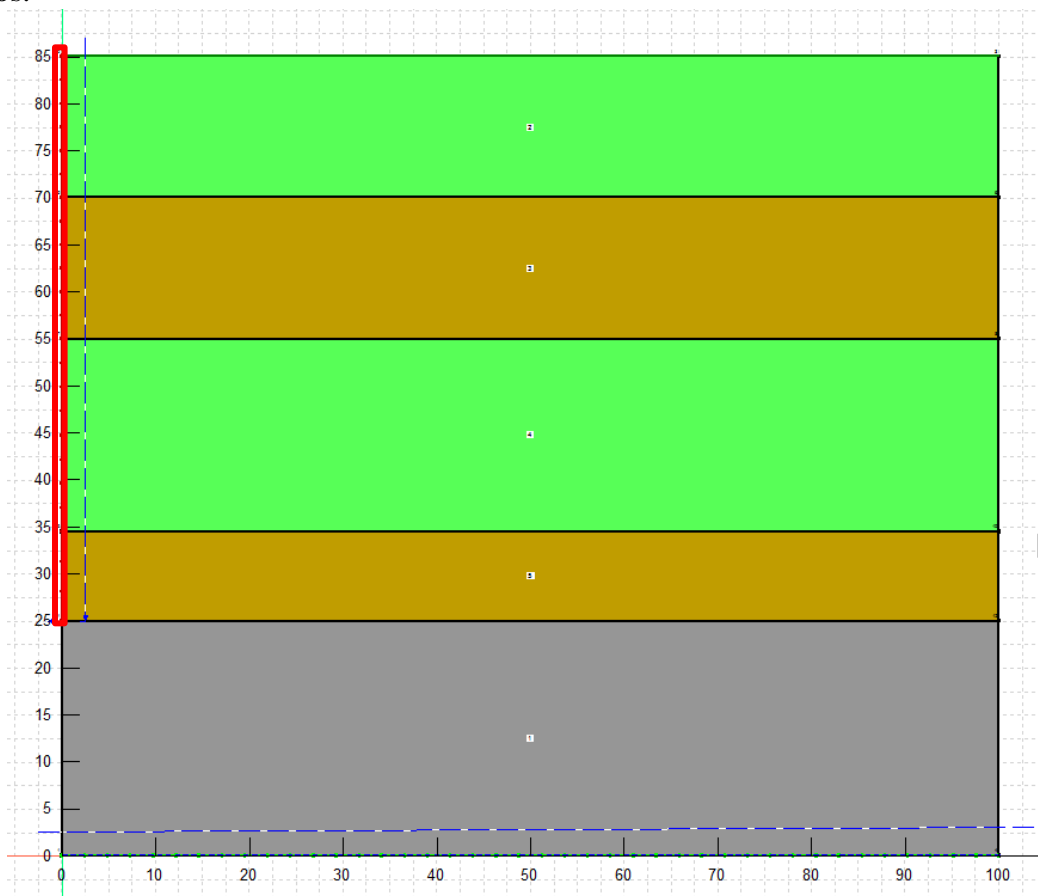


**Gráfica 3. Función conductividad hidráulica de SM. Fuente: Elaboración propia.**

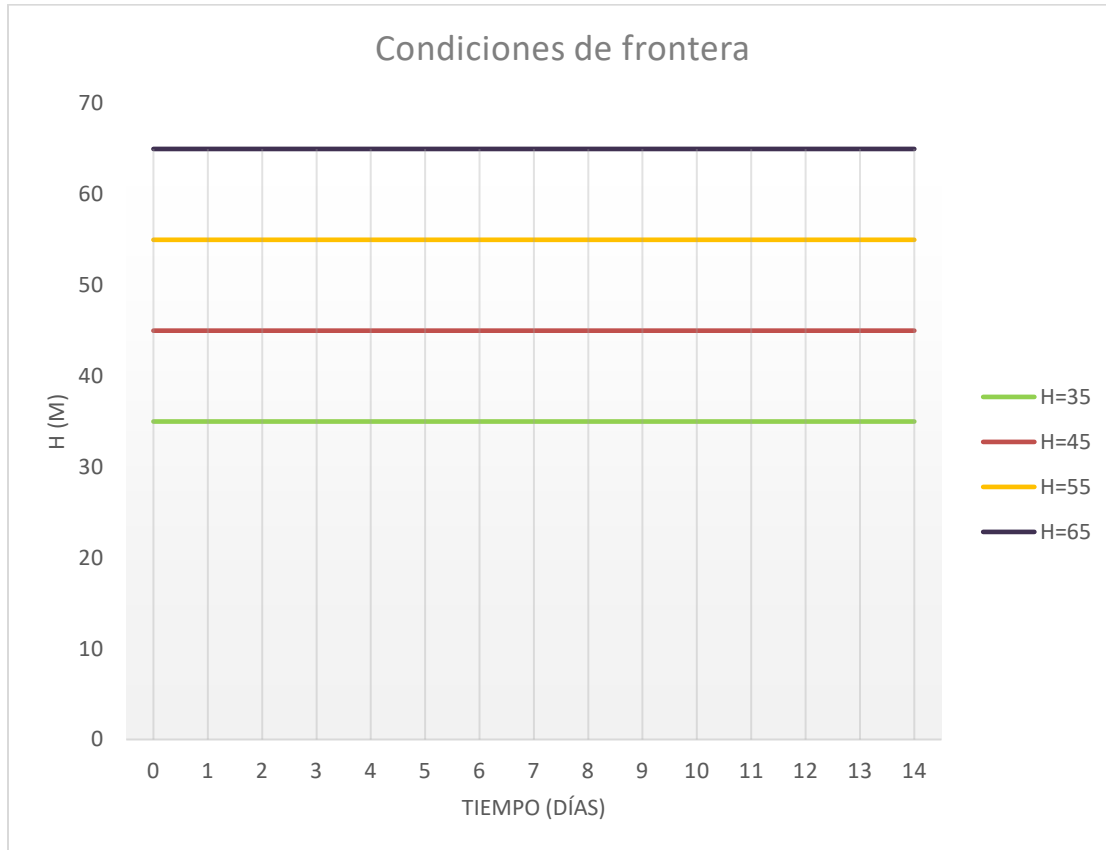


**Gráfica 4. Comparativo de funciones de conductividad hidráulica de SP y SM. Fuente: Elaboración propia.**

Una vez definidos los materiales y sus características, se definió la condición de frontera que indique el proceso de inyección de agua a los estratos. Para esto se definieron cuatro funciones diferentes en donde H se mantuvo constante en cada una de las funciones, pero se modificó entre las funciones para observar las diferencias en el caudal y volumen acumulado total. Es decir, si el valor de H incrementa se está infiltrando en estratos superiores cada vez y viceversa. Por ejemplo, haciendo referencia a la figura 16, si se indica que  $H=35$  solamente se va a infiltrar de la cota 25 a la cota 35, es decir, solamente en el primer estrato. El tiempo se tomó de 14 días constante en todos los casos. En la figura 16 se indica donde se definió la condición de frontera. En la gráfica 5 se observan los cuatro casos de condiciones de frontera utilizados.

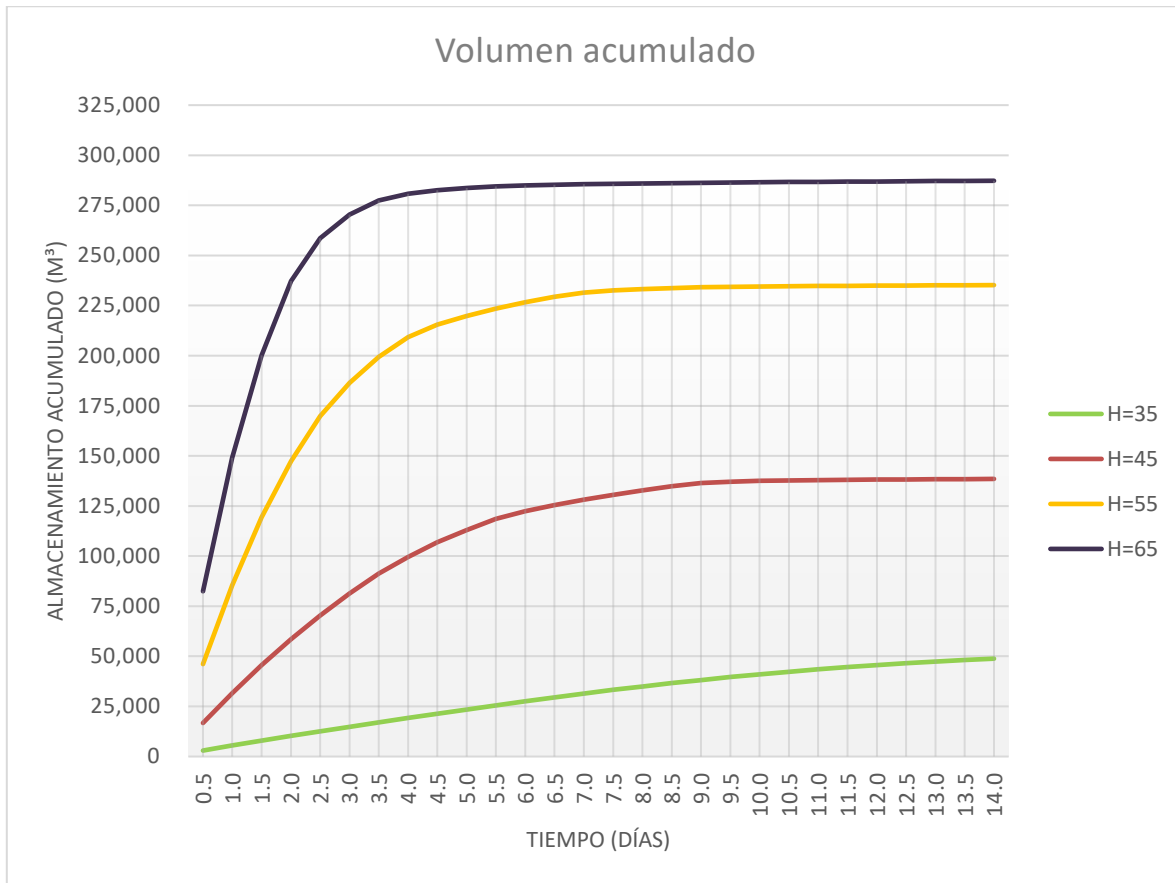


**Figura 16. Trazo de condición de frontera. Fuente: Elaboración propia.**



**Gráfica 5. Condiciones de frontera establecidas. Fuente: Elaboración propia.**

Una vez definida la geometría, los materiales y las condiciones de frontera, se procedió a realizar el análisis del cual se grafica el almacenamiento de agua acumulado durante los 14 días para cada uno de los diferentes casos de condición de frontera. En la gráfica 6 se observa que mientras H es mayor el volumen acumulado es mayor. La mayor diferencia se observa en los siguientes casos: entre el análisis en el que se contempló H=35m y el análisis de H=45m la diferencia es igual a  $89,687.3\text{m}^3$ ; mientras que entre H=45m y H=55m la diferencia es igual a  $96,695\text{m}^3$ . En el primer caso, la diferencia se debe a que se pasa de infiltrar en sólo un estrato a infiltrar en dos estratos, siendo el segundo estrato un tipo de suelo SP que es más permeable a SM que forma el primer estrato. En el caso de H=55m y H=65m se hace más visible el fenómeno de estabilización, donde para los primeros días se infiltra gran cantidad de  $\text{m}^3$  de agua, sin embargo, a partir del quinto día la acumulación es mínima.

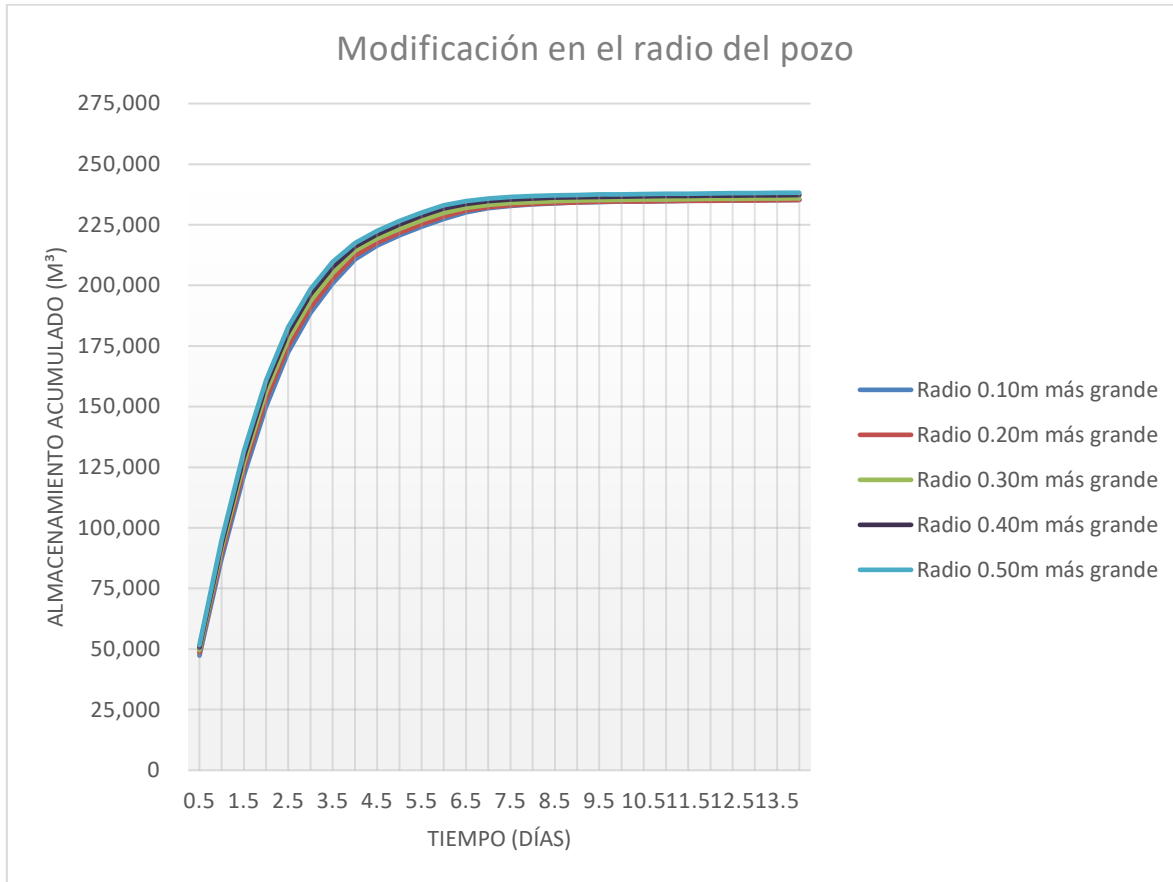


**Gráfica 6. Volumen acumulado para diferentes H durante 14 días.**

**Fuente: Elaboración propia.**

Con esto se procedió a hacer un análisis en el que -dejando una H=55m- se incrementara el radio del pozo en 0.50m analizando los cambios a cada 0.10m. En la gráfica 7 se observa la variación que hay dependiendo del cambio en el radio del pozo. Se observa que, si bien sí hay una variación en el volumen acumulado, la diferencia es mínima en todos los casos.

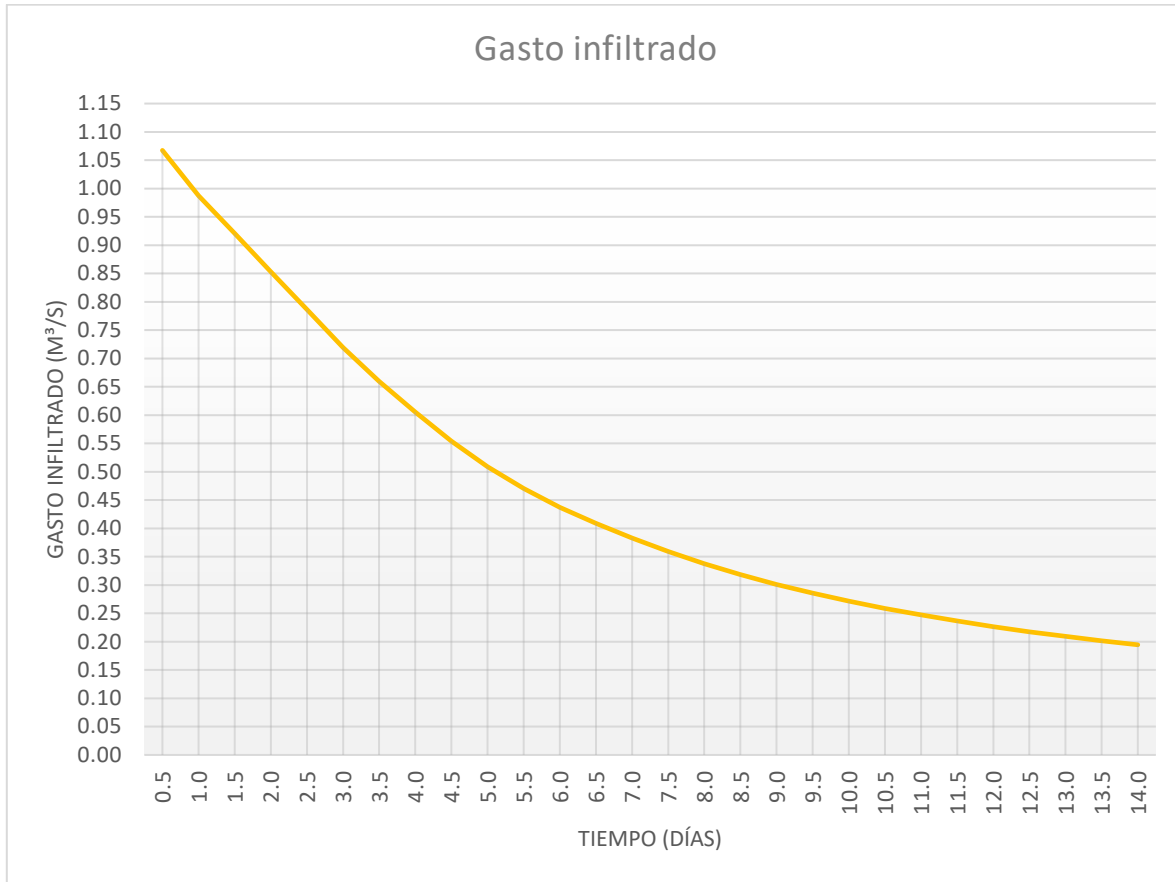




**Gráfica 7. Volumen acumulado para diferentes radios de pozo.**

**Fuente: Elaboración propia.**

A partir de estas gráficas se puede hacer una primera selección del pozo de inyección profunda. Un pozo de **60m de profundidad**, con una **columna de inyección de 30m** ( $H=55m$ ), y de un diámetro unitario, resulta el **más eficiente bajo las condiciones analizadas** ya que el volumen acumulado máximo en 14 días es  $235,213m^3$  y la infiltración inicia a 30m de profundidad, disminuyendo la posibilidad de generar erosión en los suelos que afecten cimentaciones. Para tener un parámetro de comparación entre el caudal máximo obtenido a partir del método racional y la capacidad de infiltración de un pozo de inyección profunda, se obtiene el gasto de infiltración, en  $m^3/s$ . Se observa que **el valor máximo de gasto de infiltración es de  $1.067 m^3/s$**  y ocurre al inicio del proceso de infiltración. **El valor mínimo de gasto de infiltración es de  $.1944 m^3/s$**  a los 14 días de infiltración continua.



**Gráfica 8. Variación en el gasto infiltrado a lo largo de 14 días con H=55m.  
Fuente: Elaboración propia.**

### 3.1.3 Resultados de entrevista informal

El día 12 de septiembre de 2016 se realizó una **entrevista** al Ing. Agustín Vargas, hidrólogo y promotor de los sistemas de infiltración profunda en el AMG desde hace más de 30 años. A partir de la entrevista se obtuvieron diferentes datos y recomendaciones para este proyecto. Para esto organizo la información en dos categorías:

#### 1. Antecedentes

- 1.1- Percepción positiva de este tipo de proyectos por ingenieros visitantes extranjeros invitados a colaborar en soluciones enfocadas a inundaciones y agua potable para el AMG.
- 1.2- Anécdotas en cuanto a la gestión de este tipo de proyectos con las instituciones como Secretaría de Desarrollo Urbano (ahora Secretaría de Infraestructura y Obra Pública) y el SIAPA.
- 1.3- Entrega de un presupuesto realizado por el ingeniero y presentado a las autoridades en 1999 para un pozo tipo de 100m de profundidad y 1.07m de diámetro.
- 1.4- Análisis realizado por el ingeniero en el que, para un pozo con las dimensiones comentadas en el punto anterior y considerando una columna de inyección de 50m, se obtiene un gasto inyectado igual a  $1.260\text{m}^3$ .
- 1.5- Relato de mediciones de permeabilidad de suelos en distintos puntos del AMG.

#### 2. Propuesta para este proyecto

- 2.1- Elegir una zona de estudio a partir de una microcuenca bien definida y pequeña.
- 2.2- Se recomienda buscar una zona de estudio cerca del canal de Santa Catalina de Siena debido al alta permeabilidad observada por el ingeniero en este canal.
- 2.3- Zona de estudio en la parte alta de la cuenca, para interceptar los escurrimientos.

### 3.1.3 Cotización de perforación, ademado e instrumentación de pozo

Con el fin de obtener un precio estimado de m3 infiltrado, se solicitó la cotización para la construcción de un pozo de inyección profunda. Por fines prácticos se cotizó un pozo de 100m de profundidad y de 30" (0.762m) de diámetro. Así mismo, se investigó el equipo necesario para realizar el monitoreo continuo de los niveles estáticos y dinámicos de un pozo prototipo, así como la conductividad y temperatura del agua subterránea.

Obra:		Pozo profundo para recarga de acuífero				
Lugar:						
Ciudad:		AMG				
PRESUPUESTO DE OBRA						
Clave	Partidas, elementos y conceptos	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Importe	%
1	Construcción de pozo profundo					
1.1	Movimiento de equipo de perforación completo hasta una distancia de 15km. Desde Guadalajara	lote	1	\$ 14,252.01	\$ 14,252.01	0.6%
1.2	Instalación y desmantelamiento de de equipo de perforación	lote	1	\$ 9,440.07	\$ 9,440.07	0.4%
1.3	Excavación y relleno de fosas para lodos bentoníticos	lote	1	\$ 7,398.23	\$ 7,398.23	0.3%
1.4	Suministro de bentonita para preparar lodos de perforación	ton	12	\$ 2,510.00	\$ 30,120.00	1.3%
1.5	Suministro de agua para preparar lodos limpieza del pozo	m3	450	\$ 60.00	\$ 27,000.00	1.2%
1.6	Perforación exploratoria de 17 1/2" de diámetro de 0.00 a 100.00 m, en material tipo I	m	15	\$ 1,360.97	\$ 20,414.55	0.9%
1.7	Perforación exploratoria de 17 1/2" de diámetro de 0.00 a 100.00 m, en material tipo II	m	35	\$ 2,618.82	\$ 91,658.70	4.1%
1.8	Perforación exploratoria de 17 1/2" de diámetro de 0.00 a 100.00 m, en material tipo III	m	50	\$ 5,389.44	\$ 269,472.00	12.0%
1.9	Ampliación de la exploratoria a 24" de diámetro de 0.00 a 100.00 m, en material tipo I	m	15	\$ 1,338.47	\$ 20,077.05	0.9%
1.10	Ampliación de la exploratoria a 24" de diámetro de 0.00 a 100.00 m, en material tipo II	m	35	\$ 2,196.27	\$ 76,869.45	3.4%
1.11	Ampliación de la exploratoria a 24" de diámetro de 0.00 a 100.00 m, en material tipo III	m	50	\$ 4,623.25	\$ 231,162.50	10.3%
1.12	Ampliación de la perforación de 24" a 36" de diámetro de 0.00 a 100.00 m, en material tipo I	m	15	\$ 1,702.71	\$ 25,540.65	1.1%
1.13	Ampliación de la perforación de 24" a 36" de diámetro de 0.00 a 100.00 m, en material tipo II	m	35	\$ 2,544.20	\$ 89,047.00	4.0%
1.14	Ampliación de la perforación de 24" a 36" de diámetro de 0.00 a 100.00 m, en material tipo III	m	50	\$ 6,240.10	\$ 312,005.00	13.9%
1.15	Suministro de tubería de acero lisa de 30" x 1/4"	m	50	\$ 3,028.80	\$ 151,440.00	6.7%
1.16	Suministro de tubería de acero ranurada de 30" x 1/4"	m	50	\$ 3,258.00	\$ 162,900.00	7.2%
1.17	Colocación de tubería de 30" x 1/4"	m	100	\$ 201.27	\$ 20,127.00	0.9%
1.18	Suministro, flete y colocación del filtro de grava	m3	28	\$ 1,502.91	\$ 42,081.48	1.9%
1.19	Suministro, flete y colocación de dispersor de arcillas	litro	150	\$ 40.82	\$ 6,123.00	0.3%
1.20	Equipo de perforación trabajando durante la limpieza del pozo y/o en operaciones ordenadas por el cliente	Hora	24	\$ 1,789.17	\$ 42,940.08	1.9%
1	Construcción de pozo profundo				\$ 1,650,068.77	73%

Obra:	Pozo profundo para recarga de acuífero
Lugar:	
Ciudad:	AMG
PRESUPUESTO DE OBRA	

Clave	Partidas, elementos y conceptos	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Importe	%
<b>2</b>	<b>Instrumentación y monitoreo</b>					
2.1	Cinta de señales biodegradable roja 2cm x 65m	pza	1	\$ 52.63	\$ 52.63	0.0%
2.2	Cinta de señales biodegradable naranja 2cm x 65m	pza	1	\$ 52.63	\$ 52.63	0.0%
2.3	Bolsa de polietileno para muestras de suelo de 30x50cms cal. 800 (17 piezas/kg)	kg	2	\$ 60.75	\$ 121.50	0.0%
2.4	Sonda TLC modelo 107 de 150m, para medición de niveles, conductividad y temperatura.	pza	1	\$ 39,674.88	\$ 39,674.88	1.9%
2.5	Solución para calibración	pza	1	\$ 589.49	\$ 589.49	0.0%
2.6	Levellogger Edge LTM200 para registrar variación de nivel de agua y temperatura. Incluye: Sensor de presión Hastelloy, sensor de temperatura, batería y un registrador con memoria FRAM para 40,000 juegos de registros.	pza	1	\$ 13,605.90	\$ 13,605.90	0.7%
2.7	Barologger EDGE M1.5 para compensación barométrica.	pza	1	\$ 7,008.96	\$ 7,008.96	0.3%
2.8	Interfaz para levellogger para extracción de datos.	pza	1	\$ 7,906.11	\$ 7,906.11	0.4%
2.9	Paquete de comunicación USB lectura directa	pza	1	\$ 8,077.92	\$ 8,077.92	0.4%
2.10	Adaptador de lectura directa a lector óptico	pza	1	\$ 1,336.72	\$ 1,336.72	0.1%
2.11	Cable de soporte de acero inoxidable para levellogger	m	200	\$ 9.20	\$ 1,840.00	0.1%
2.12	Bailer de PVC claro 1.05"x 1" de una válvula, reutilizable. Diseñado para muestreo de agua	pza	5	\$ 634.17	\$ 3,170.85	0.2%
2.13	Rainlogger Edge registrador de datos de pluviómetro	pza	1	\$ 6,314.58	\$ 6,314.58	0.3%
2.14	Pluviómetro de 8" para rainlogger	pza	1	\$ 21,341.20	\$ 21,341.20	1.0%
<b>2</b>	<b>Instrumentación y monitoreo</b>				<b>\$ 111,093.37</b>	<b>5%</b>
	<b>Subtotal</b>				<b>\$ 1,761,162.14</b>	
	<b>IVA (16%)</b>				<b>\$ 281,785.94</b>	
	<b>Total</b>				<b>\$ 2,042,948.08</b>	<b>100.0%</b>



### 3.2 Discusión y conclusiones

Como primer hallazgo se menciona que la zona de estudio que el Ing. Vargas recomendó abordar resultó la zona más idónea después de hacer el análisis utilizando el SIG y tomando en cuenta tanto las variables geológicas, geográficas e hidrológicas de la zona. El Ing. Vargas recomendó esta zona con base en observaciones y experiencias en pruebas de permeabilidad en la zona, que, si bien no eran pruebas en profundidad, es un antecedente favorable para el proyecto. Así mismo, es de gran importancia señalar que el Ing. Vargas proyectó un caudal de infiltración igual a  $1.26\text{m}^3/\text{s}$  que es muy parecido a los  $1.067\text{m}^3/\text{s}$  de caudal máximo de infiltración obtenido a partir del modelo en SEEP/W, dando sustento a los resultados obtenidos en este proyecto.

Otro punto importante es comparar el caudal máximo -producto del método racional- de la microcuenca del Chicalote con el caudal máximo de infiltración. En la microcuenca del Chicalote, para un periodo de retorno de 5 años y una intensidad de lluvia de  $56.238\text{mm/h}$  se obtuvo un caudal máximo de escurrimiento igual a  $117.57\text{m}^3/\text{s}$ . Es decir, cada pozo de inyección profunda puede infiltrar el 0.9% del mayor escurrimiento que puede ocurrir cada 5 años. En otras palabras, sería necesario instalar aproximadamente 110 pozos a lo largo de la cuenca del Chicalote para infiltrar todo este escurrimiento. En cuanto la ubicación de los pozos, se toma la recomendación hecha por el Ing. Agustín Vargas, donde es preferible ubicar estos elementos de infiltración en la parte alta de la cuenca para interceptar los escurrimientos conforme se van generando.

Como se mencionó anteriormente, en el año 2015 las inundaciones en toda el AMG causaron la muerte de nueve personas y pérdidas económicas de aproximadamente mil millones de pesos (Castillo, 2016). Contrastando el costo por las pérdidas económicas de un año en todo el AMG, con el costo de un pozo de inyección profunda se concluye que si se invierte esa cantidad de dinero en un proyecto de este tipo se podrían construir 500 pozos de este tipo, lo cual es 4.5 veces mayor a los necesarios en la microcuenca del chicalote y que resolverían el problema de inundación en la zona de Plaza del sol que, como se mencionó, es uno de los tres puntos con más reportes de inundaciones en el AMG.

Por último, es importante resaltar que en el proceso de inyección profunda el diámetro del pozo no representa una mayor modificación ni al gasto de infiltración ni al volumen total infiltrable. Siendo así la profundidad y ubicación del pozo la variable más importante para hacer más eficiente cada pozo de inyección profunda. Así mismo, es de suma importancia atender el sistema de pretratamiento para evitar infiltrar contaminantes a las aguas subterráneas. Para esto se recomienda no utilizar los primeros volúmenes de escurrimiento, incluyendo un mecanismo que no permita la infiltración de las primeras precipitaciones ya que son las que traerán más contaminantes al escurrir por las superficies.

En este trabajo se buscó evaluar una innovación tecnológica en el ámbito de la sustentabilidad, aplicando en un caso de estudio en el contexto del AMG. Para esto se partió desde la selección de una zona de estudio apta para la aplicación de un sistema de recarga artificial como lo son los pozos de inyección profunda. Se encontró que ciertas zonas del AMG cuentan con las características geográficas, hidrológicas y geológicas que permiten

aplicar un sistema de inyección profunda. Una de esas zonas es la microcuenca del Chicalote, que se convirtió en zona de estudio de este proyecto. Encontramos en ella una profundidad de la roca apta para los sistemas de recarga vertical, poca pendiente del terreno idónea para procesos de infiltración, inundaciones documentadas, nivel estático que denota un fuerte abatimiento de las aguas subterráneas y un caudal máximo de agua pluvial aprovechable igual a  $117.57\text{m}^3/\text{s}$ . Se considera que este valor puede disminuir sumando el tiempo de traslado a través de colectores al tiempo de concentración superficial, para lo que se recomienda obtener información sobre los colectores que se encuentran en la zona de la microcuenca del Chicalote y sus características de funcionamiento.

Los sistemas de recarga artificial en profundidad no es una técnica nueva y como se ha mencionado, es una técnica muy utilizada para lograr la explotación racional de un acuífero. Con el modelado en elemento finito se corroboró que los sistemas de inyección profunda en la microcuenca del Chicalote son un elemento que permite la infiltración y abonar a la reducción de la sobreexplotación del acuífero, aprovechando una fuente de agua muy importante como lo son las pluviales y, construyendo un sistema formado por aproximadamente 50 pozos, es posible reducir las máximas inundaciones a presentarse en 50 años a la mitad de su expresión actual.

A partir de lo investigado y realizado en este proyecto se concluye que es imprescindible realizar una prueba piloto que permita el monitoreo del comportamiento del agua subterránea y del proceso de recarga en profundidad, permitiendo calibrar modelos numéricos para su futura aplicación en distintos puntos de la ciudad. Una vez definida la ingeniería de una prueba piloto y el sistema de tratamiento, es necesario iniciar la gestión de permisos con la CONAGUA y cumplir con todos los requisitos de la NOM-015-CONAGUA-2007. Con esto se iniciaría un proceso para implementar este tipo de tecnología en la ciudad con altos potenciales hacia la sustentabilidad. Es decir, esta tecnología es viable económicamente ya que reduciría los costos anuales por pérdidas materiales en las inundaciones; tiene una fuerte implicación social al evitar los peligros que implica habitar una ciudad que se inunda frecuentemente y aprovechando esos volúmenes de escurrimientos para proveer a la población de agua potable; y finalmente se lograría recargar los acuíferos al infiltrar los volúmenes de agua comentados anteriormente.

Es importante continuar con las investigaciones sobre agua subterránea en el AMG, en donde se identifiquen los flujos horizontales en el acuífero, proyectar la dirección y velocidad del movimiento líquido infiltrado para definir las posibles zonas de extracción para su aprovechamiento.

Este trabajo comprueba que es una tecnología que permitirá una mejor gestión del agua subterránea y se espera que de paso a un nuevo paradigma en el que el agua pluvial sea aprovechada para resolver los problemas que se han abordado aquí y dé paso hacia una sustentabilidad hídrica en la ciudad.

## Glosario

**1.-Eficiencia para la recarga de acuíferos:** A partir de la capacidad de infiltración y del volumen de agua inyectable es que se determinará la eficiencia de un pozo propuesto en el área de estudio definida.

**2.-Eficiencia para la disminución de inundaciones:** definida por la cantidad de agua que se infiltra en lugar de seguir como escurrimiento y la disminución de volumen e incidencia de inundaciones en los puntos críticos del área de estudio.

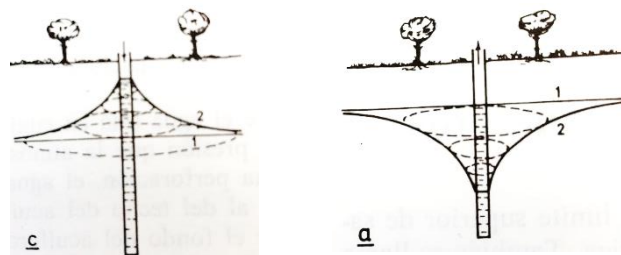
**3.-Coeficientes de permeabilidad:** este parámetro se refiere al caudal que pasa por una sección de suelo, teniendo las mismas dimensiones de una velocidad (m/s) (Custodio, 1996). Como referencia a la permeabilidad de los suelos en el AMG se tiene una prueba realizada por Saborío (1995) utilizando el método de pozos radiales, donde se obtuvo un coeficiente de permeabilidad de  $4.1 \times 10^{-3}$  m/s. Así mismo Vargas, Ochoa & Zamudio (2016) realizaron pruebas a los principales tipos de suelo encontrados en la región reportan permeabilidades con los siguientes valores:

**Permeabilidad más alta:**  $2.73 \times 10^{-3}$  m/s

**Permeabilidad más baja:**  $3.66 \times 10^{-5}$  m/s

**Permeabilidad promedio:**  $1.47 \times 10^{-3}$  m/s

**4.-Niveles estáticos y dinámicos de agua subterránea:** el nivel de agua en el acuífero cuando no existe bombeo se le llama estático, a diferencia del dinámico que se presenta cuando existe un sistema de captación en funcionamiento. En el caso de un pozo de extracción, se genera un cono invertido de descensos y al introducir agua en el acuífero con un pozo se genera un domo (Custodio, 1996).



**Figuras G1 y G2. Cono invertido de descensos (der) y domo por inyección (izq). Fuente: Custodio (1996).**

**5.-Capacidad de infiltración:** la infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo, a través de la superficie de la tierra, y queda retenida por él. Así, la capacidad de infiltración de un suelo es la máxima cantidad de agua que puede absorber en una unidad de tiempo. Al relacionar esta característica del suelo con la intensidad de la lluvia se obtiene la cantidad de agua que penetrará en el suelo y la que escurrirá superficialmente (Custodio, 1996).

**6.-Contaminantes en el agua pluvial:** los contaminantes asociados a los escurrimientos urbanos pluviales son: sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo, materiales orgánicos, metales pesados, aceites e hidrocarburos y bacterias. La cantidad de estos contaminantes tiende a crecer con el grado de urbanización (Horner, Skuplen, Livingston, & Shaver, 1994)

**7.-Inundaciones:** con fines de estudio de este proyecto se entiende como un evento que debido a la precipitación se genera un incremento en el nivel de la superficie de agua generando daños en la población e infraestructura (Salas & Jiménez, 2004). En el AMG se reportan 147 sitios donde se han presentado algún tipo de inundación, donde el origen de estos problemas se debe principalmente a las modificaciones de los cauces naturales.(IIEG, 2014)



## Bibliografía

- AREMA. (2017). Entrega de la PTAR y pozos de inyección PTAR Villas de N<sup>a</sup> Señora Asunción. Recuperado el 26 de octubre de 2017, a partir de <http://www.arema.com/es/noticias/entrega-de-la-ptar-y-pozos-de-inyecci%C3%B3n-ptar-villas-de-n%C2%AA-se%C3%B1ora-asunci%C3%B3n>
- Bürkner, H.-J., & Ochoa García, H. (Eds.). (2012). *Gobernanza y gestión del agua en el occidente de México: la metrópoli de Guadalajara* (1a. edición). Tlaquepaque, Jalisco, México: ITESO, Universidad Jesuita de Guadalajara.
- C., Stefan., & N., Ansems. (2016). Web-GIS of global inventory of managed aquifer recharge (MAR) applications. Recuperado el 2 de octubre de 2017, a partir de <http://marportal.un-igrac.org>
- Castillo, P. A. del. (2016). 40% del agua, se pierde en la red... o en cuentas. Recuperado el 14 de noviembre de 2016, a partir de <http://www.agustindelcastillo.com/2016/05/40-del-agua-se-pierde-en-la-red-o-en.html>
- Castillo, P. A. del. (2011). SIAPA pierde 514 mdp por las tarifas subsidiarias. Recuperado el 3 de noviembre de 2017, a partir de <http://www.agustindelcastillo.com/2011/09/siapa-pierde-514-mdp-por-las-tarifas.html>

Comisión Estatal del Agua. (2009). Proyecto Integral de Saneamiento y Abastecimiento. Recuperado el 17 de noviembre de 2015, a partir de <http://www.ceajalisco.gob.mx/zcg-proyecto.swf>

CONAGUA. (2009). NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y especificaciones de las obras y del agua. Recuperado el 18 de noviembre de 2015, a partir de [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5105754](http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5105754)

CONAGUA. (2014). *Normatividad en México de recarga artificial de acuíferos*. Presentado en Soluciones a la Contaminación de Suelos y Acuíferos, México. Recuperado a partir de [http://www.iingen.unam.mx/es-mx/BancoDeInformacion/MemoriasdeEventos/2doCursoSuelosAcuiferos/Normas\\_CONAGUA.pdf](http://www.iingen.unam.mx/es-mx/BancoDeInformacion/MemoriasdeEventos/2doCursoSuelosAcuiferos/Normas_CONAGUA.pdf)

CONAGUA. (2015). Registro Público de Derechos de Agua (REPDa). Recuperado el 17 de noviembre de 2015, a partir de <http://www.conagua.gob.mx/Repda.aspx?n1=5&n2=37&n3=115>

Custodio, Emilio. (1996a). *Hidrología Subterránea* (Vol. II). Barcelona: Omega.

Custodio, Emilio. (1996b). *Hidrología Subterránea* (Segunda, Vol. I). Barcelona: Omega.

Diario Oficial de la Federación. (2015). *Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos*. (p. 53). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado a partir de [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/DOF\\_20\\_04\\_2015\\_DAS.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/DOF_20_04_2015_DAS.pdf)

Fernández Escalante, E. (2010). *La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible desarrollo tecnológico*. Madrid: Grafinat.

Fernández Escalante, Enrique, García Rodríguez, Manuel, & Villarroja Gil, Fermín. (2005).

Inventario de experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo. *Tecnología y desarrollo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, III*. Recuperado a partir de [http://www.academia.edu/download/30336756/TECEOC05\\_001.pdf](http://www.academia.edu/download/30336756/TECEOC05_001.pdf)

GEOEX. (2004). Estudio de actualización geohidrológica integral de las cuencas Atemajac-Toluquilla, Estado de Jalisco, México. Guadalajara, México: SIAPA.

GEO-SLOPE International Ltd. 2017. Heat and mass transfer modeling with GeoStudio 2018. Calgary, Alberta, Canada.

Gleason Espíndola, José Arturo. (2014). *Sistemas de agua sustentables en las ciudades* (Primera). México: Trillas.

Greater Sidney Local Land Services. (2014). Adopting WSUD | WSUD. Recuperado el 17 de noviembre de 2015, a partir de <http://www.wsud.org/adopting-wsud/>

Horner, R. R., Skuplen, J. J., Livingston, E. H., & Shaver, H. E. (1994). *Fundamentals of Urban Runoff Management: Technical and Institutional Issues*. Terrene Institute, Incorporated. Recuperado a partir de <https://books.google.com.mx/books?id=4e7mAAAACAAJ>

IIEG. (2014). Ubicación de sitios con más peligro a inundaciones en la Zona Metropolitana de Guadalajara [Gubernamental]. Recuperado el 16 de mayo de 2016, a partir de <http://iieg.gob.mx/contenido/GeografiaMedioAmbiente/INUNDACIONESGDL.pdf>

INEGI. (2011). Censo de Población y Vivienda, 2010, México.

INEGI. (2014). Modelos Digitales de Elevación (MDE) - Descripción. Recuperado el 1 de noviembre de 2017, a partir de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx>

- Jiménez, B., Marín, L., Morán, D., Escolero Fuentes, O. A., Alcocer, J., Martínez, V. H., & Academia Mexicana de Ciencias. (2004). *El agua en México vista desde la Academia*. México, D. F.: Academia Mexicana de Ciencias.
- Jose, R., Wade, R., & Jefferies, C. (2015). Smart SUDS: recognising the multiple-benefit potential of sustainable surface water management systems. *Water Science & Technology*, 71(2), 245. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.484>
- Martínez, S. (2011). *Introducción a la Hidrología Superficial* (2a ed.). México: Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- ONU. (1992). Programa 21: Capítulo 18 “Protección de la calidad y el suministro de los recursos de agua dulce: Aplicación de criterios integrados para el aprovechamiento, ordenación y uso de los recursos de agua dulce”. Recuperado el 14 de noviembre de 2016, a partir de <http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/agenda21spchapter18.htm>
- Ramírez, G. (2013). Área Metropolitana de Guadalajara. Recuperado el 15 de septiembre de 2017, a partir de <https://www.jalisco.gob.mx/es/jalisco/guadalajara>
- Rojas-Valencia, M. N. ., nrov@pumas.iingen.unam. m., Ibarra, A. C., Bolaños, R. G., & Mier, M. V. (2013). Different treatment trains for rainwater purification for human consumption in México City. *Turkish Online Journal of Science & Technology*, 3(4), 48–54.
- Salas, M. A., & Jiménez, M. (2004). *Inundaciones* (1a ed., Vol. 3). México: CENAPRED. Recuperado a partir de [http://www.files.cenapred.gob.mx/es/publicacionesRelevantes/FASCICULO\\_INUNDACIONES\\_2013.pdf](http://www.files.cenapred.gob.mx/es/publicacionesRelevantes/FASCICULO_INUNDACIONES_2013.pdf)

- Sanders, L. (1998). *A manual of Field Hydrogeology*. Prentice Hall.
- SIAPA. (2014). *Lineamientos Técnicos Factibilidad SIAPA*. Jalisco: SIAPA.
- Tetreault, D. (2015). Una taxonomía de modelos de desarrollo sustentable. *Espiral. Estudios sobre Estado y Sociedad*, 10(29). Recuperado a partir de <http://www.revistascientificas.udg.mx/index.php/EEES/article/view/1271>
- Villarreal, F. G., Villanueva, C., Nava, A., Salas, M., & Segura, R. V. (2014). Inventario de la recarga artificial en México. *XXIII Congreso Nacional de Hidráulica*. Recuperado a partir de [https://www.academia.edu/22146935/Inventario\\_de\\_la\\_recarga\\_artificial\\_en\\_M%C3%A9xico](https://www.academia.edu/22146935/Inventario_de_la_recarga_artificial_en_M%C3%A9xico)
- Woods Ballard, B, Wilson, Udale-Clarke, H, Illman, S, Scott, T, Ashley, R, & Kellagher, R. (2015). *The SuDS Manual*. CIRIA. Recuperado a partir de <https://storage-ec2-5.sharefile.com/download.ashx?dt=dt5701ddbc21554e6389e33be61ead1147&h=8hbg9j%2bj4uEbPZKJCh46iB5kuE%2fsjtPYTok%2fo9eHU1A%3d>
- Zamudio Zavala, Pablo & Gómez Mora, I. (2016). *Zonificación sísmica de la Zona Metropolitana de Guadalajara, una propuesta de modificación de las NTC para diseño de sismo 1997*. XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica 2016 (RNIG), Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG). Mérida, Yucatán.
- Zamudio Zavala, P. E., Vargas del Río, D., Ochoa-González, G.H. (2016). *Correlaciones entre propiedades mecánicas y propiedades físicas en suelos pumíticos no saturados*. XXVIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica 2016 (RNIG), Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG). Mérida, Yucatán.



## 4. Anexos

### 4.1 Resolución 4284217 del SIAPA



UNIDAD DE TRANSPARENCIA E INFORMACIÓN PÚBLICA DEL SISTEMA  
INTERMUNICIPAL DE LOS SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO.

#### RESOLUCION AFIRMATIVA PARCIAL:

- - - En la ciudad de Guadalajara Jalisco, siendo las 10:00 diez horas, del día 09 de octubre de 2017, la suscrita **MTRA. GLADYS Y. MARTINEZ FOMBONA**, Titular de la Unidad de Transparencia del Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado SIAPA, en unión de los analistas de transparencia procedió a dictar la siguiente: -----

#### RESOLUCIÓN: -----

- - - Vista la solicitud de información presentada por el **C. (sin nombre)**, el día **29 de septiembre de 2017**, vía INFOMEX a este Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado SIAPA, con número de folio **4284217**, en el que solicita: "Solicito la siguiente información de los pozos de extracción de agua ubicados en las colonias incluidas en el documento adjunto "Infomex.docx": -----

- Ubicación -----
- Histórico de niveles estáticos del agua subterránea (hasta los datos más cercanos a la actualidad) -----
- Niveles dinámicos -----
- Profundidad de perforación -----
- Volumen extraído -----
- Calidad del agua extraída"-----

- - - Téngase por recibido el **MEMORÁNDUM SD/754/2017**, suscrito por el Ing. **Jose Luis Montaña Ochoa**, Encargado de la Superintendencia de Operación, y el Ing. **Marco Antonio Castillo Nieto** Subdirector de Distribución, de este Sistema

SISTEMA INTERMUNICIPAL DE LOS SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO

Dr. R. Michel No. 461 · S.R. · Col. Las Conchas · C.P. 44430 · Guadalajara, Jalisco, México · T. (33) 38-37-42-72

[www.siapa.gob.mx](http://www.siapa.gob.mx)



**SIAPA**

Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable Alcantarillado, SIAPA, en el cual da respuesta a la solicitud de información. -----

--- Por lo anterior tengo a bien dictar la siguiente: -----

**RESOLUCIÓN AFIRMATIVA PARCIAL** -----

**PUNTOS RESOLUTIVOS:** -----

- - - **PRIMERO.-** Este Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado SIAPA, es Competente para conocer de la presente solicitud de información por tal razón, se dio por admitida, toda vez que la misma reúne los requisitos legales a que alude los artículos 78, 79 y 82 de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública del Estado de Jalisco y sus Municipios. -----

- - - **SEGUNDO.-** Notifíquese al C. (sin nombre), vía INFOMEX, la presente Resolución y en base a los **MEMORÁNDUM SD/754/2017, suscrito por el Ing. Jose Luis Montaña Ochoa, Encargado de la Superintendencia de Operación, y el Ing. Marco Antonio Castillo Nieto Subdirector de Distribución,** dígame lo siguiente: - - -

Se anexa memorándum antes referido con el que se da respuesta a su solicitud de información.

- - - Dando así puntual respuesta a la solicitud de información. Lo anterior con fundamento en lo dispuesto por los artículos. 78.1 79, 80 fracción III, 84, numeral 1, 85 86, numeral 1, fracción II, 87, fracción III, 90 de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública del Estado de Jalisco y sus Municipios, así como los artículos 105, fracción I, 107, 108 y 109, del Reglamento de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, y demás aplicables a la Legislación vigente. -----

- - - **TERCERO. Infórmese;** al solicitante, que la información se entrega en el estado que se encuentra y preferentemente en el formato solicitado. No existe obligación de

SISTEMA INTERMUNICIPAL DE LOS SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO

Dr. R. Michel No. 461 • S.R. • Col. Las Conchas • C.P. 44430 • Guadalajara, Jalisco. México • T. (33) 38-37-42-72

[www.siapa.gob.mx](http://www.siapa.gob.mx)



**SIAPA**

procesar, calcular o presentar la información de forma distinta a como se encuentre, de conformidad con el Artículo 87, numeral 3, de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública del Estado de Jalisco y sus Municipios.-----

- - - **CUARTO.-** Infórmese; al solicitante, que el acceso a la información se realiza mediante **INFORME ESPECIFICO**, de conformidad con el Artículo 90, de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública del Estado de Jalisco y sus Municipios.-----

- - - Así lo Resolvió la Titular de la Unidad de Transparencia, del Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado SIAPA, en unión de los Analistas de Transparencia, siendo el 09 de octubre de 2017, y de conformidad con la fracción III del artículo 32, de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública del Estado de Jalisco y sus Municipios.-----

**MTRA. GLADYS Y. MARTINEZ FOMBONA**  
**TITULAR DE LA UNIDAD DE TRANSPARENCIA DEL SISTEMA INTERMUNICIPAL**  
**DE LOS SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO SIAPA.**

**C. DIEGO RIVAS CEDEÑO**  
**ANALISTA DE TRANSPARENCIA**

**LIC. FCO. JAVIER DELGADILLO RGUEZ.**  
**ANALISTA DE TRANSPARENCIA**

Esta foja de firmas pertenece a la resolución afirmativa parcial, de fecha 09 de octubre de 2017, del 4284217.

SISTEMA INTERMUNICIPAL DE LOS SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO

Dr. R. Michel No. 461 • S.R. • Col. Las Conchas • C.P. 44430 • Guadalajara, Jalisco. México • T. (33) 38-37-42-72

[www.siapa.gob.mx](http://www.siapa.gob.mx)





MEMORANDUM

No. SD- 754/2017.

Guadalajara, Jal., Octubre 02 del 2017.

ING. ALEJANDRO GUTIERREZ MORENO.  
DIRECTOR TECNICO.  
PRESENTE.

En relación al memorándum UT/754/2017 referente a la solicitud del **C. SIN NOMBRE** con número de expediente 4284217 en el que solicita lo siguiente:

Solicito la siguiente información de los pozos de extracción de agua ubicados en las colonias incluidas en el documento adjunto "informex.docx".

Ubicación

**RESPUESTA:**

Respecto a la información solicitada, hago de su conocimiento que la ubicación exacta de nuestros pozos es considerada por éste Organismo Operador como Estratégica, por lo que la misma se encuentra reservada por el Comité de Clasificación de Información Pública del Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA), dentro del Acuerdo Clasificadorio de Instalaciones Estratégicas de esta Institución; aprobado por el Consejo del Instituto de Transparencia e Información Pública de Jalisco (ITEI), en la vigésima segunda sesión ordinaria celebrada el pasado 24 de junio del 2015; de conformidad con el Artículo 105 del Reglamento de La Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública del Estado de Jalisco y sus Municipios; por lo tanto no podemos entregarla.

Histórico de niveles estáticos del agua subterránea (hasta los datos mas cercanos a la actualidad), niveles dinámicos, profundidad de perforación y volumen extraído

**RESPUESTA:**

Se anexa tabla de datos correspondiente a la información solicitada.

Calidad del agua extraída.

**RESPUESTA:**

Cumple con la NOM 127-SSA1-1994

ATENTAMENTE,

ING. JOSE LUIS MONTAÑO OCHOA  
ENCARGADO DE LA SUPERINTENDENCIA  
DE OPERACIÓN

ING. MARCO ANTONIO CASTILLO NIETO  
SUBDIRECTOR DE DISTRIBUCIÓN

c.c. Superintendencia de Operación.  
c.c. Archivo  
IngMAC/mpac..



DIRECCION TECNICA

03 OCT. 2017

RECIBIDO

SISTEMA INTERMUNICIPAL DE LOS SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO

Dr. R. Michel No. 461 · S.R. · Col. Las Conchas · C.P. 44430 · Guadalajara, Jalisco, México · T. (33) 38-37-42-72

[www.siapa.gob.mx](http://www.siapa.gob.mx)

**SIAPA, SECCIÓN DE  
MACROMEDICIÓN**

Pozos en operables, periodo:  
Agosto de 2017  
ACUÍFERO ATEMAJAC

POZO	Nivel Estático en m 1	Nivel Dinámico en m 2	Profundidad en m	Volumen extraído mensual en m <sup>3</sup>
AGUA AZUL 2	3	3.7	35	6,624
AGUA AZUL 3	3	8	27	7,452
AMARANTO	62	114	220	8,376
ARCOS DE ZAPOPAN	58	Sin información	300	39,215
BAJO LA ARENA 2	71	56	500	34,559
BAJO LA ARENA 3	31	107	300	86,246
BAJO LA ARENA 4	87	165	300	15,262
BAJO LA ARENA A	89	Sin información	250	17,808
BAJO LA ARENA B	56	105	275	77,119
BENITO JUÁREZ	54.9	150	80	15,736
BIMBO	13.3	104	130	14,334
BOSQUES DE LA VICTORIA	26	143	68	104,551
BOSQUES VALLARTA	74	116	200	16,070
DIANA	60.17	147	258	30,057
EDUCADORES JALISCIENCES	123	225	300	25,615
EL AMIAL	93	152	350	8,981
FRANCISCO VILLA	17	95	170	37,693
FRAY PEDRO	32.25	88	276	20,779
GIRASOLES	14	134	130	51,645
GORGOROS	6	133	80	17,242
HACIENDA REAL (TANQUE JARDINES DE	58	140	350	40,319
INGLATERRA	86.86	97	247	3,651
JARDINES DEL BOSQUE	22	113	200	34,285
LA HORTALIZA	128	132	250	15,555
LA MORA	24	155	90	18,749
LAS PALOMAS, PARQUE DE LAS AVES	72	87	350	990
LOMA BONITA 1	34.1	67	200	4,798
LOMA BONITA 2	34.71	54	70	7,673
LOMAS DE LOS PAJARITOS	Sin información	132	300	22,793
MAGNOLIAS	108	180	350	32,912
PANTEÓN	55	116	Sin información	27,266
POTRERO EL CAMBIO	85	28	270	52,182
PUERTA DE HIERRO	57	113	Sin información	62,695
REAL DEL CARMEN	69	122	320	55,336
RESIDENCIAL SANTA MARGARITA	63	Sin información	350	82,048
RESIDENCIAL VICTORIA	34	150	96	35,331
SAN JUAN DE OCOTÁN 1	93	154	300	16,144
SAN JUAN DE OCOTÁN 4	81	142	294	91,732
SANTA LAURA	82.22	Sin información	130	19,044
SANTILLANA	65	124	Sin información	7,675
SONEE	142	187	207	26,947
TABACHINES 1	30.2	45	159	37,067
TANQUE TESISTÁN	44	57	248	24,936
TENOCHTITLAN	49	38	144	51,433



**SIAPA, SECCIÓN DE  
MACROMEDICIÓN**

Pozos en operables, periodo:  
Agosto de 2017  
ACUÍFERO ATEMAJAC

POZO	Nivel Estático en m 1	Nivel Dinámico en m 2	Profundidad en m	Volumen extraído mensual en m <sup>3</sup>
TEPEYAC 2	63	52	250	24,105
TESISTÁN 3B	56	79.56	435	142,173
TESISTÁN 3C	78.29	94.47	185	82,506
TESISTÁN 3D	52	82	500	25,422
TESISTÁN 3E	69.5	79	452	103,021
TESISTÁN 8	63.93	69.61	500	53,841
TESISTÁN 10	90.38	114.77	128	8,255
TESISTÁN 11	79	89	132	32,879
TESISTÁN 16 ( SANTA CRUZ DEL VALLE)	137	192	350	19,852
TESISTÁN 17 (ALMENDROS)	105	137	350	40,196
TESISTÁN 20	86.81	132.56	205	50,019
TESISTÁN 21	57.8	61.33	118.5	80,367
TESISTÁN 37	Sin información	87	156	128,945
TESISTÁN 39 (VALLE DE LA	95	154	350	113,027
TESISTÁN 40	59.68	106	175	67,164
TESISTÁN 42	75	100.05	300	37,699
TESISTÁN 43	81.13	102.79	300	50,288
TESISTÁN 46 R	83	Sin información	255	44,958
TESISTÁN 47	75	138.35	300	18,749
TESISTÁN 49	24	109	275	6,474
TESISTÁN 51	Sin información	104.75	300	116,402
TESISTÁN 52	86	97	300	93,959
TESISTÁN 53	71.43	93.88	300	31,209
TESISTÁN 54	72.73	109.84	300	34,808
TESISTÁN 55	117.3	149	290	1,161
TESISTÁN 56	55.2	89.25	270	48,211
TESISTÁN 57	78	154	238	55,065
TESISTÁN 58	60.92	116.06	285	29,052
TESISTÁN 59	77.88	110	234	21,878
TESISTÁN 60	61.65	135	235	8,165
TESISTÁN 61	96.47	135.84	275	75,119
TESISTÁN 62	113.87	150	300	32,141
TESISTÁN 63	41.11	91.63	245	51,238
TESISTÁN 64	73.5	119.5	270	14,879
TESISTÁN 65	53	67	230	78,275
TESISTÁN 66	Sin información	Sin información	Sin información	64,503
TESISTÁN 67	113.81	131.47	226	50,106
TESISTÁN 68	86.59	155.31	300	83,030
TESISTÁN 69	63.51	111.53	250	65,999
TESISTÁN 70	71.43	103.85	250	154,260
TESISTÁN 71	66.81	118.49	250	88,150
TESISTÁN 72	66.16	88.64	250	204,604
TESISTÁN 73	95	87.5	270	90,356
TESISTÁN 75	73	87	300	21,050

**SIAPA, SECCIÓN DE  
MACROMEDICIÓN**

Pozos en operables, periodo:  
Agosto de 2017  
ACUÍFERO ATEMAJAC

POZO	Nivel Estático en m 1	Nivel Dinámico en m 2	Profundidad en m	Volumen extraído mensual en m <sup>3</sup>
TESISTÁN 77	83	121	315	54,939
TESISTÁN 78	94	94	300	8,884
TESISTÁN 79	96	103	300	2,037
TESISTÁN 80	45	139	310	88,731
TESISTÁN 81	85	121	322	66,915
TIERRA RESIDENCIAL	96	108	300	58,171
VALLE NORTE	Sin información	Sin información	Sin información	34,169
VALLE REAL 1	76	152	200	76,280
VALLE REAL 2	99	178	150	29,179
VALLE REAL 3	99	121	Sin información	30,175
VILLA FANTASÍA	85	115	300	9,373
VILLA FONTANA 2 (LA ESTRADA)	66	152	350	56,746
VISTA HERMOSA (TRIANGULO)	64	178	350	15,070

## SIAPA, SECCIÓN DE MACROMEDICIÓN

Pozos operables, periodo:

Agosto de 2017

ACUÍFERO TOLUQUILLA

POZO	Nivel Estático en m 1	Nivel Dinámico en m 2	Profundida d en m	Volumen extraído mensual en m <sup>3</sup>
ARBOLEDAS	61.26	79	250	25,564
ARENALES TAPATIOS 1	87	93	300	45,472
CORETT	65	101	300	39,576
EL TEMPIZQUE	74	89	350	37,365
GARABATOS	74.6	93.3	300	1,927
GEOVILLAS	Sin información	Sin	Sin	16,344
IXTEPETE	68.43	82	300	54,231
LA ABADÍA 2	74	83	350	56,246
LA COFRADÍA	74	78	350	102,799
LA DURAZNERA	52	Sin	300	65,505
LAS PINTAS	39	73	250	18,723
LÓPEZ MATEOS LAS FUENTES	50	66	250	73,886
PARQUES DE LA VICTORIA 2	45	130	350	5,299
PASEOS DEL PRADO	Sin información	Sin	Sin	23,433
PASEOS DEL SOL	26	78	250	19,103
PROVIDENCIA TONALÁ	Sin información	Sin	Sin	45,533
SAN SEBASTIANITO 3	31.9	136	300	23,065
SAN SEBASTIANITO 4	36	67	320	58,925
SANTA ANA TEPETITLÁN 1	70	79	250	88,740
SANTA ANA TEPETITLÁN 2	49	92	250	37,354
SANTA ANA TEPETITLÁN 3	79	85	260	59,271
TATEPOSCO 2	79	82	250	55,981
TOLUQUILLA 1	34.8	135.053	300	54,150
TOLUQUILLA 2	43	94.4	300	94,428
TOLUQUILLA 5	41	116	300	43,104
TOLUQUILLA 7	49	64	230	161,242
TOLUQUILLA 10	8.86	13	300	39,128
TOLUQUILLA 11	62.2	Sin	300	37,167
TOLUQUILLA 12	23.8	74.4	300	101,228
TOLUQUILLA 14	35	133	300	72,368
TOLUQUILLA 16	40	109.4	287	44,466
TOLUQUILLA 18	30	98	300	93,082
TOLUQUILLA 19	28	68	300	134,448
TOLUQUILLA 21	31	46	300	26,553



## 4.2 Concentrado de Estudios de Mecánica de Suelos

Laboratorio:	Exploraciones Geotecnia de Occidente, S.A. de C.V.	Exploraciones Geotecnia de Occidente, S.A. de C.V.	Exploraciones Geotecnia de Occidente, S.A. de C.V.	Exploraciones Geotecnia de Occidente, S.A. de C.V.	Ing Juan Carlos Santana Santana
Ubicación:	Avenida Acueducto	Avenida Acueducto	Avenida Acueducto	Avenida Acueducto	Canal Tchaikovsky
Archivo:	INFORME M.S	SPT1	SPT2	SPT3	Estudio Mecanica de Suelos Canal Tchaikovsky
Profundidad (m)	Descripción	Descripción	Descripción	Descripción	Descripción
0 a 5	Arena pumitica limosa color café claro con finos poco plásticos y grava. El número de golpes promedio obtenido en la prueba de penetración estándar resultó de 10.	Arena pumitica y limos de color café, finos no plasticos con pocas gravas de pomez, sin humedad aparente y de compacidad de suelta a semi-compacta.	Arena pumitica y limos de color café, finos no plasticos con pocas gravas de pomez, sin humedad aparente y de compacidad de suelta a semi-compacta.	Arena pumitica y limos de color café, finos no plasticos con pocas gravas de pomez, sin humedad aparente y de compacidad de suelta a semi-compacta.	Rellenos.
5 a 10	Arena pumitica limosa color café, húmeda con finos poco plásticos y grava. El número de golpes promedio obtenido en la prueba de penetración estándar resultó de 18.	Arena pumitica y limo de color café con humedad aparente.	Arena pumitica y limo de color café con humedad aparente.	Arena pumitica y limo de color café con humedad aparente.	Arenas pumiticas limosas.
10 a 15	Arena pumitica limosa color café con finos poco plásticos y grava. El número de golpes promedio obtenido en la prueba de penetración estándar resultó de 45.	Arena pumitica y limo de color café, finos no plasticos y algo de gravas, sin humedad aparente y de compacidad muy compacta.	Arena pumitica y limo de color café, finos no plasticos con gravas, sin humedad aparente y al final con humedad aparente, de compacidad muy compacta.	Arena pumitica y limo de color café, finos no plasticos y algo de gravas, sin humedad aparente y de compacidad muy compacta.	
15 a 20					
20 a 25	Arena pumitica limosa color café con finos poco plásticos y grava. El número de golpes promedio obtenido en la prueba de penetración estándar resultó de 13.		Arena pumitica y limo de color café, finos no plasticos con gravas, sin humedad aparente y al final con humedad aparente, de compacidad muy compacta.	Arena pumitica y limos de color café, finos no plasticos y algo de gravas, con humedad aparente.	
25 a 30				Arena pumitica y limos de color café, finos no plasticos sin humedad aparente y de compacidad muy compacta.	
30 a 35	Arena pumitica limosa color café con finos poco plásticos y grava. El número de golpes promedio obtenido en la prueba de penetración estándar resultó de 32.	Arena pumitica y gravas con algo de limos de color café, finos no plasticos con presencia de nivel de agua, de compacidad compacta.		Arena y limo de color café, finos no plasticos, humedad aparente y de compacidad semi-compacta.	
35 a 40	Arena pumitica limosa color café con finos poco plásticos y grava.	Arena y limos de color café, finos no plasticos con gravas, sin humedad aparente y de compacidad muy compacta.		Arena y limos de color café, finos no plasticos con pocas gravas y de compacidad muy compacta.	
40 a 45					
45 a 50					
50 a 55					
55 a 60					

Laboratorio:	Ing Juan Carlos Santana Santana	EPCOC, S.A. de C.V.	EPCOC, S.A. de C.V.	Seismocontrol, S.A. de C.V.
Ubicación:	Centro Comercial Plaza del Sol	Trasloma	Trasloma	Trasloma
Archivo:	CENTRO COMERCIAL PLAZA DEL SOL	(TRS-1)	TRS-2)	(DH)
Profundidad (m)	Descripción	Descripción	Descripción	Descripción
0 a 5	Arenas y gravas (jales) limosos.	Cobertura.	Cobertura.	Arena pumítica limosa.
5 a 10		Arena pumítica limosa.	Arena pumítica limosa.	
10 a 15		Arena pumítica limosa cementada.		
15 a 20				Toba pumítica de alta compacidad.
20 a 25		Arena pumítica limosa cementada.		
25 a 30				
30 a 35				
35 a 40				
40 a 45				
45 a 50				
50 a 55				
55 a 60				



Laboratorio:	EPCOC, S.A. de C.V.	EPCOC, S.A. de C.V.	Estudios Ingeniería y Cimentación S.A de C.V.	Estudios Ingeniería y Cimentación S.A de C.V.	Estudios Ingeniería y Cimentación S.A de C.V.
Ubicación:	Arcos de Guadalupe	Arcos de Guadalupe	Av. Guadalupe	Av. San Francisco - Colonia Misión de San Francisco	Av. San Francisco - Colonia Misión de San Francisco
Archivo:	INDEPENDENCIA 565 (Sondeo 1)	INDEPENDENCIA 565 (Sondeo 2)	FOLIO #148-15	FOLIO #123-16_(Sondeo 1)	FOLIO #123-16_(Sondeo 2)
Profundidad (m)	Descripción	Descripción	Descripción	Descripción	Descripción
0 a 5	Arena pumítica limosa media a fina, con gravilla color café claro a beige.	Arena pumítica limosa media a fina, con gravilla color café claro a beige.	Relleno de arena pumítica limosa y poco escombros color café claro.	Relleno de arena pumítica limosa color café.	Relleno de arena pumítica limosa color café.
5 a 10					
10 a 15					
15 a 20					
20 a 25					
25 a 30					
30 a 35					
35 a 40					
40 a 45					
45 a 50					
50 a 55					
55 a 60					

Laboratorio:	SANDSTORM-GAM	SANDSTORM-GAM	SANDSTORM-GAM	SANDSTORM-GAM	SANDSTORM-GAM
Ubicación:	Centro Comercial Puerta de Hierro	Centro Comercial Puerta de Hierro	Centro Comercial Puerta de Hierro	Centro Comercial Puerta de Hierro	Centro Comercial Puerta de Hierro
Archivo:	Centro Comercial Puerta de Hierro InfoGeo_(SPT1)	Centro Comercial Puerta de Hierro InfoGeo_(SPT2)	Centro Comercial Puerta de Hierro InfoGeo_(SPT3)	Centro Comercial Puerta de Hierro InfoGeo_(SPT4)	Centro Comercial Puerta de Hierro InfoGeo_(SPT5)
Profundidad (m)	Descripción	Descripción	Descripción	Descripción	Descripción
0 a 5	Arena limosa, de compacidad muy suelta, suelta, media, densa y muy densa, color café y café claro (Jal).	Arena limosa, de compacidad suelta, color café (Jal). Arena bien graduada con limo, de compacidad suelta y media, color café (Jal).	Arena limosa, de compacidad suelta a media, color café (Jal). Arena mal graduada, de compacidad muy suelta a suelta, color café (Jal).	Arena limosa, de compacidad muy suelta y suelta, color café (Jal). Arena mal graduada, de compacidad muy suelta, suelta y media, color café claro (Jal).	Arena limosa, de compacidad muy suelta y media, color café claro. Arena bien y mal graduada con limo, de compacidad suelta y media, color café claro.
5 a 10	Arena limosa, de compacidad muy suelta, suelta, media, densa y muy densa, color café y café claro (Jal).	Arena limosa, de compacidad media y densa, color café y café claro (Jal).	Arena limosa, de compacidad muy suelta a suelta, color café claro (Jal). Arena mal graduada con limo, de compacidad media, color café (Jal).	Arena limosa, de compacidad suelta, media y densa, color café claro (Jal). Grava limosa con arena, de compacidad densa y muy densa, color café claro.	Arena limosa, de compacidad media, densa y muy densa, color café claro. Limo de baja compresibilidad, de consistencia dura, color café.
10 a 15	Limo arcilloso de baja compresibilidad, de consistencia muy firme, color café (Jal). Arena limosa, de compacidad media y muy densa, color café oscuro.	Arcilla, de compacidad media, color café.	Arena limosa, de compacidad densa y muy densa, color café claro (Jal). Limosa arenoso, de baja compresibilidad, de consistencia firme, color café claro.	Arena limosa, de compacidad densa, color café claro (Jal). Arena mal graduada con limo, de compacidad media, color café claro.	
15 a 20	Limo de baja compresibilidad, de consistencia muy firme a dura, color café claro (Jal).	Arena limosa, de compacidad media, densa y muy densa, color café claro (Jal).	Arena limosa, de compacidad media, densa y muy densa, color café claro (Jal).	Arena limosa, de compacidad media y densa, color café claro (Jal).	
20 a 25	Arena limosa, de compacidad media y densa, color gris y gris claro (Jal).			Arena limosa, de compacidad densa y muy densa, color café	
25 a 30	Arena limosa con grava, de compacidad densa y muy densa, color café claro (Jal).				Arena limosa, de compacidad densa y muy densa, color café claro.
30 a 35	Arena limosa, de compacidad muy densa, color gris (Jal).			Arena limosa, de compacidad densa y muy densa, color gris claro (Jal).	
35 a 40					
40 a 45	Arena limosa, de compacidad densa y muy densa, color café y café claro (Jal). Limo arcilloso de baja compresibilidad, de consistencia muy firme, color café (Jal).			Limo arcilloso de baja compresibilidad, de consistencia dura, color gris. Arcilla de baja compresibilidad, de consistencia dura, color café.	
45 a 50					
50 a 55					
55 a 60					

Laboratorio:	SANDSTORM-GAM	SANDSTORM-GAM	SANDSTORM-GAM	SANDSTORM-GAM	SANDSTORM-GAM
Ubicación:	Centro Comercial Puerta de Hierro	Centro Comercial Puerta de Hierro	Centro Comercial Puerta de Hierro	Centro Comercial Puerta de Hierro	Centro Comercial Puerta de Hierro
Archivo:	Centro Comercial Puerta de Hierro InfoGeo_(SPT6)	Centro Comercial Puerta de Hierro InfoGeo_(SPT7)	Centro Comercial Puerta de Hierro InfoGeo_(SPT8)	Centro Comercial Puerta de Hierro InfoGeo_(SPT9)	Centro Comercial Puerta de Hierro InfoGeo_(SPT10)
Profundidad (m)	Descripción	Descripción	Descripción	Descripción	Descripción
0 a 5	Arena limosa, de compacidad media, color café. Limo de baja compresibilidad, de consistencia media, color café.	Limo de baja compresibilidad, de consistencia dura, color café. Arena limosa, de compacidad muy suelta, color café. Arena limosa, de compacidad media, color café claro. Limo de baja compresibilidad, consistencia firme, color café	Arena limosa, de compacidad suelta, color gris oscuro. Arena limosa, de compacidad muy suelta, color gris claro. Limo de baja compresibilidad, de consistencia blanda, color café	Arena bien graduada con limo y grava, de compacidad media, color café. Arena bien graduada con limo, de compacidad suelta y media, color café claro.	Arena limosa, de compacidad media, color café claro. Arena bien graduada con limo y grava, de compacidad muy suelta, color café claro (Jal). Limo con arena, de consistencia muy blanda, color café claro.
5 a 10	Arena limosa, de compacidad media, densa y muy densa, color café (Jal).	Arena limosa, de compacidad media, densa y muy densa, color café claro. Arena bien graduada con limo, de compacidad densa, color café claro.	Arena bien graduada con limo, de compacidad media, color café	Arena limosa, de compacidad media a muy densa, color café a gris (Jal).	Arena limosa con grava, de compacidad media a densa, color café claro (Jal).
10 a 15			Arena limosa de compacidad densa y muy densa, color café claro.		Arena limosa, de compacidad densa y muy densa, solo gris a café claro (Jal).
15 a 20	Arena bien graduada, de compacidad media, color café. Arena mal graduada con limo de compacidad densa, color café (Jal). Arena limosa, de compacidad media, color café claro.	Arena limosa de compacidad media, color café claro. Limo de baja compresibilidad, de consistencia dura, color café claro. Arena limosa de compacidad muy densa, color café claro.	Arena mal y bien graduada, de compacidad media, densa y muy densa, color café claro. Arena limosa, de compacidad muy densa, color café claro.	Arena mal graduada, de compacidad densa a media, color gris (Jal).	
20 a 25	Arena limosa, de compacidad muy densa, color café claro. Limo de baja compresibilidad, de consistencia muy firme, color café (Jal).	Arena mal graduada, de compacidad densa, color café claro. Arena mal graduada con limo, de compacidad muy densa, color café claro.	Arena bien graduada, de compacidad densa, color café claro. Arena mal graduada con limo, de compacidad densa, color café claro.	Arena limosa, de compacidad densa y muy densa, color gris a café claro (Jal).	Arena limosa con grava, de compacidad media, color gris (Jal).
25 a 30	Limo de baja compresibilidad, de consistencia dura, color café claro.	Arena limosa, de compacidad muy densa, color café claro.	Limo de baja compresibilidad, de consistencia dura, color café claro. Arena limosa de compacidad muy densa, color café claro.		Arena limosa, de compacidad densa y muy densa, color gris y café claro (Jal).
30 a 35	Arena limosa, de compacidad muy densa, color café claro.		Limo de baja compresibilidad, de consistencia dura, color café claro.		
35 a 40	Grava limosa, color gris claro. Arena limosa, de compacidad muy densa, color gris claro.		Arena limosa, de compacidad muy densa, color café claro.		
40 a 45					
45 a 50					Arcilla ligera arenosa, de consistencia firme a dura, color café.
50 a 55					
55 a 60					

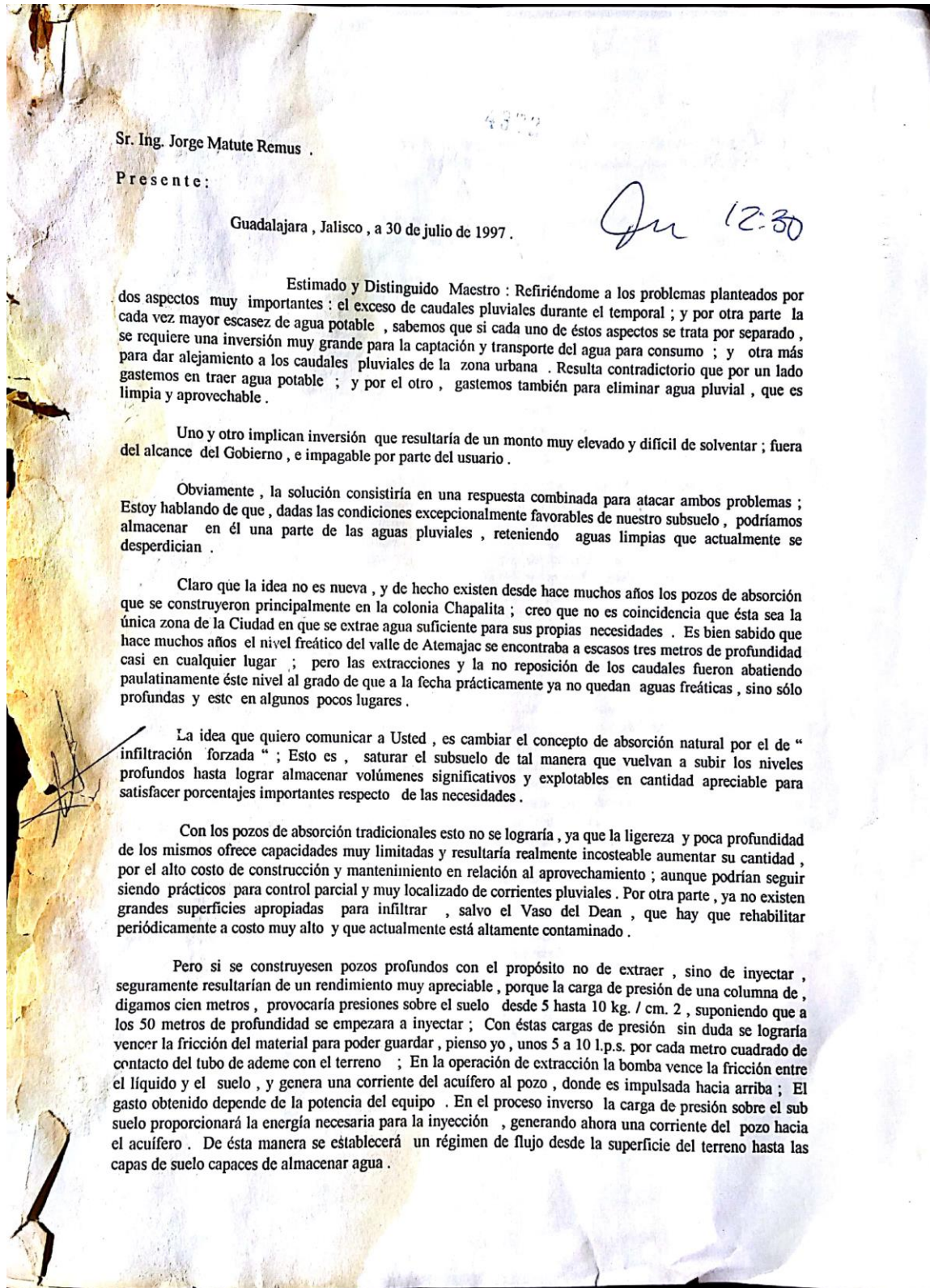
<b>Laboratorio:</b>	SANDSTORM-GAM	Estudios Ingeniería y Cimentación S.A de C.V.	Estudios Ingeniería y Cimentación S.A de C.V.	Centro de investigación para el Desarrollo Industrial	Centro de investigación para el Desarrollo Industrial
<b>Ubicación:</b>	Av. Las Rosas - Colonia Chapalita	Av. Quetzalcoatl - Colonia Ciudad del Sol	Av. Quetzalcoatl - Colonia Ciudad del Sol	Torres La Calma	Torres La Calma
<b>Archivo:</b>	Perfil SPT One Chapalita	QUETZALCOATL No 2384 (Sondeo1)	QUETZALCOATL No 2384 (Sondeo2)	TORRES LA CALMA (Sondeo 1)	TORRES LA CALMA (Sondeo 2)
<b>Profundidad (m)</b>	<b>Descripción</b>	<b>Descripción</b>	<b>Descripción</b>	<b>Descripción</b>	<b>Descripción</b>
<b>0 a 5</b>	Arena limosa de compacidad muy suelta, café oscuro. Jal poco arenoso de compacidad muy suelta a media, gris claro con gravilla. Arena pumítica limosa con compacidad suelta a media, color café claro.	Relleno de arena pumítica limosa con gravilla color café.	Relleno de arena pumítica limosa con gravilla color café.	Arena limosa con compacidad suelta	Arena limosa con compacidad suelta
<b>5 a 10</b>	Limo arenoso jaloso de consistencia firma, color café amarillento. Limo arenoso jaloso de consistencia muy firma a dura, color café claro.				
<b>10 a 15</b>	Arena pumítica limosa de compacidad densa, color café claro.				
<b>15 a 20</b>					
<b>20 a 25</b>	Arena limosa de compacidad muy densa, color café				
<b>25 a 30</b>					
<b>30 a 35</b>					
<b>35 a 40</b>					
<b>40 a 45</b>					
<b>45 a 50</b>					
<b>50 a 55</b>					
<b>55 a 60</b>					

<b>Laboratorio:</b>	Ing Juan Carlos Santana Santana	Ing Juan Carlos Santana Santana	Ing Juan Carlos Santana Santana	Ing Juan Carlos Santana Santana
<b>Ubicación:</b>	La Estancia	La Estancia	La Estancia	Nodo vial Av. Lopez Mateos y Mariano Otero
<b>Archivo:</b>	DEBUSSY la estancia	EDIFICIO av. guadalupe No 5040	LA ESTANCIA practica de tiro de golf	nodo vial av. lopez mateos y mariano otero
<b>Profundidad (m)</b>	<b>Descripción</b>	<b>Descripción</b>	<b>Descripción</b>	<b>Descripción</b>
0 a 5	Arenas pumíticas limosas con una coloración beige y una relación intergranular que oscila entre media a fina, asociada en toda su columna estratigráfica con porcentajes variables de gravilla	Relleno. Arena pumítica limosa con una coloración que va de café a beige y una relación intergranular que oscila entre media a fina, asociada en toda su columna estratigráfica con bajos porcentajes de gravilla	Relleno. Arena pumítica limosa con una coloración que va de café claro a beige y con una relación intergranular que va de media a fina, asociada en toda su columna estratigráfica con bajos porcentajes de gravilla.	Arenas pumíticas limosas, con una coloración que va de café a gris claro y con una relación intergranular que varia predominantemente entre media a fina, asociada con bajos porcentajes de gravilla. Depósitos de Jales gruesos, de origen piroclásticos (composición característica de los suelos de la localidad).
5 a 10				
10 a 15				
15 a 20				
20 a 25				
25 a 30				
30 a 35				
35 a 40				
40 a 45				
45 a 50				
50 a 55				
55 a 60				





### 4.3 Documentos entregados por Ing. Agustín Vargas





Creo que la propuesta suena razonable , pues técnicamente no hay diferencia entre el flujo impulsado desde abajo por medio de bombeo , y el contrario , dado por la alimentación superficial y la carga de presión que se generará al llenarse el pozo .

De ésta manera , considerando un pozo de cien metros de profundidad y cincuenta de columna de inyección ( por poner un ejemplo ) , con un diámetro de 1.07 mts , la superficie en contacto con el material receptor sería de 168 m. 2. y si la infiltración al subsuelo fuese de 7.5 l.p.s. por m.2. en promedio , el gasto inyectado sería de 1.260 m.3 por segundo ; Este caudal sumaría en dos horas la cantidad de 9,072 metros cúbicos . Considerando unas 20 inyecciones durante todo el temporal , el volumen total anual por cada pozo sería de más o menos 180,000 metros cúbicos . Se puede ver que si la idea funciona ( y técnicamente no hay razón en contrario ) , sería muy substancial la " cosecha " anual de agua por cada pozo , dado que la profundidad podrá ser mucho mayor de cien metros . Así , a medida que crezca la carga de presión el volumen inyectado será proporcionalmente más alto . Y serán importantes también los volúmenes que ahora ya no serán canalizados al sistema de colectores . Se podría pensar que con un sistema de pozos localizados convenientemente , las avenidas pluviales serán controladas sin dificultad y con una inversión muy baja respecto de lo que sería construyendo nuevos colectores ó ampliando los existentes .

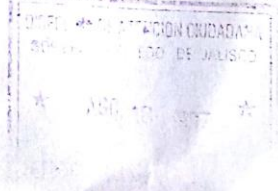
Como ilustración de un caso real de infiltración natural , me puedo referir al tramo que queda útil del antiguo Canal Interceptor del Poniente sobre la av. Catalina de Siena , entre la Av. Guadalupe y Av. San Luis Gonzaga : en una longitud aproximada de 190 m.l. de éste canal , he comprobado , mediante mediciones que he practicado , que la cantidad infiltrada en un sólo día es de 7,000 m.3. aproximadamente. Por tanto , es efectivo que el suelo tiene una gran capacidad de recepción de líquido ; Con mucha mayor razón se obtendrían resultados mediante cargas de presión del orden de los cien metros o más ; Y como ésta zona hay muchas en la ciudad donde concurren flujos suficientes para construir estructuras de infiltración forzada , y que a la vez tienen un sub suelo apropiado para almacenar agua .

Este aprovechamiento resultaría barato en relación a la inversión : haciendo números muy gruesos puede ser que el costo de cada pozo de cien metros , incluyendo la captación , la construcción de una " caja de agua " diseñada para regularizar el caudal y sedimentar los sólidos ; la perforación ; tubería de ademe ; filtro y tubería interior , el costo estimado sería del orden de unos 3.0 millones de pesos a valor actual ; pensando que la vida útil fuese de 40 años , ( con un mantenimiento anual para limpieza y desazolve ) , el costo por metro cúbico de líquido obtenido sería de 42 centavos ; el costo de la energía para bombeo alrededor de cuarenta centavos ; mas los costos indirectos y de mantenimiento , en total el metro cúbico de agua costaría , digamos , un peso ; Esto equivale a gastar veinte centavos al día por el agua para cada habitante a la dotación de 200 litros ; es decir , 30.42 pesos mensuales por familia de cinco miembros ( sin incluir los costos de distribución y tratamiento , en su caso ) . Esta tarifa es razonable y al alcance de la capacidad de pago del usuario , por lo que la inversión sería sin duda fácilmente recuperable .

Si éstas consideraciones le parecen a Usted interesantes , resultaría muy atractivo y barato analizar la factibilidad del proyecto ; una perforación de prueba en un diámetro de 16" exterior , e interior de 12" serviría para encontrar los factores de proporcionalidad para extrapolar con poco error lo que sería para diámetros hasta de 1.07 o aún mayores ; El costo no será en modo alguno prohibitivo porque después de la exploración se puede recobrar toda la tubería , ( y aún aprovechar ésta perforación como avance de la definitiva ) . costaría únicamente la perforación , que en éste tipo de suelo es rápida y de bajo costo .

De ésta manera se podrán ubicar sucesivamente los lugares adecuados para formar un proyecto general de inyección forzada y elaborar , previos resultados encontrados por exploración local , un programa para inversión en función de los dineros disponibles .

Así , con una cantidad adecuada de pozos se podría lograr infiltrar toda la sobrecarga pluvial que incide sobre los colectores , misma que tiende a ser mayor por el incremento constante de las áreas urbanizadas .



Y por otro lado , éste modo de dar solución al problema , permitiría ir resolviendo localmente cada situación de conflicto en forma individual y prioritaria , permitiéndolo dar avance al programa a medida que se disponga de recursos , sin que se tenga que aplicar una inversión adelantada para empezar a obtener resultados inmediatos .

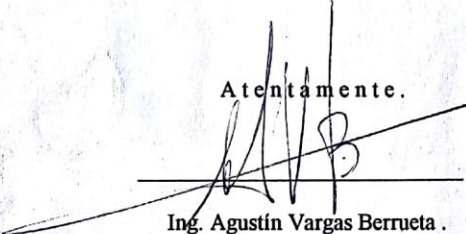
En fin , sea éste o cualquier otro el modo de hacer llegar las aguas pluviales al sub suelo profundo , es indudable que contamos en él con una capacidad muy generosa para almacenar agua ; Incluso creo que aún si no hubiese aprovechamiento alguno , el sólo hecho de evitar inversión en colectores y restituir al suelo las características originales ya sería ganancia , para reparar en parte la acelerada degradación que se le ha provocado . Y finalmente las famosas tormentas de Guadalajara vendrán resultando un recurso extremadamente valioso .

Pienso que vale ampliamente la pena invertir en un proyecto de investigación integral que seguramente reportaría experiencias muy provechosas en favor de la regeneración y habitabilidad de la Ciudad , y desde luego , útiles también para ser aplicadas en otras ciudades de conformación geológica favorable , y / o con acuíferos sobre explotados .

Esta es a grandes rasgos la idea que quería poner a su consideración , sabiendo que no hay otra persona con la experiencia y autoridad técnica de Usted para analizarla con mayor objetividad .

Por último , quisiera rogarle , si ésta propuesta le parece digna de ser estudiada , interponga sus muy reconocidos oficios para dar impulso a la promoción de éste proyecto ante las instancias oficiales que correspondan , contribuyendo desde luego con mi participación activa en lo que pueda ser de ayuda .

Atentamente.

  
Ing. Agustín Vargas Berrueta .  
Tel. 1. 22. 21. 06  
Fax 8.25.11.73



C. c. p. Sr. Ing. Alberto Cárdenas Jiménez . Gobernador Constitucional del Estado de Jalisco



Ing. Agustín Vargas Berrueta  
Circunvalación Oriente no. 129 Cd. Granja  
Zapopan, Jal.  
Tel. 122-21-06  
fax. 627-24-36  
Presente.

98 MAR 10 12:18

Sr. Ing. Carlos Petersen Biester.  
Secretario de Desarrollo Urbano.  
Gobierno del Estado de Jalisco.

SECRETARIA DE PLANEACION  
URBANO DEL ESTADO  
DE JALISCO

Distinguido Señor: De conformidad con lo tratado recientemente, respecto de la propuesta presentada a Usted, acerca de los pozos profundos para la "Inyección Forzada" de caudales pluviales al subsuelo profundo cuyo objetivo sería la recarga de alto rendimiento a los acuíferos de la Ciudad, y a la vez el alivio de sobrecarga pluvial al sistema de colectores me permito remitir a Usted la información recabada por mí respecto del costo de un proyecto tipo para prueba, en cumplimiento de lo convenido.

El pozo tipo presupuestado sería de las características siguientes:

- |       |                                     |   |
|-------|-------------------------------------|---|
| I.-   | Profundidad total:                  | 100 mts   |
| II.-  | Diámetro final                      | 1.07 mts (42")  |
| III.- | Profundidad de inicio de inyección: | 50.00 mts. (tentativamente)   |
| IV.-  | Columna de inyección:               | desde 50.00 hasta 100.00 mts.   |
| V.-   | Ubicación:                          | Plantilla del Canal Interceptor del Poniente entre Av. Guadalupe y San Luis Gonzaga |

Pda	Concepto	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Importe.
1.-	Transporte, instalación, desmantelamiento y retiro del equipo de perforación	lote	1.00	6,000.00	6,000.00
2.-	Fosas para batir bentonita de perforación	pza	2.00	1,200.00	2,400.00
3.-	Suministro de bentonita	ton	20.00	806.00	16,120.00
4.-	Acarreo de agua en camión tanque 1er km.	m.3	500.00	16.38	8,190.00
5.-	Acarreo de agua en camión tanque km. subsecuentes al primero	m.3 - km	1,000.00	1.45	1,450.00
6.-	Perforación exploratoria a diámetro reducido	m.l	100.00	270.00	27,000.00
7.-	Ampliación de la exploratoria a 22" de diámetro	m.l	100.00	426.67	42,667.00
8.-	Ampliación de 22" a 34"	m.l	100.00	250.00	25,000.00
9.-	Ampliación de 34" a 46"	m.l	100.00	250.00	25,000.00
10.-	Suministro de tubería lisa de 42"	m.l	50.00	1,600.00	80,000.00
11.-	Suministro de tubería ranurada de 42"	m.l	50.00	1,800.00	90,000.00
12.-	Colocación de tubería de 42"	m.l	100.00	50.00	5,000.00
13.-	Dispersante de arcillas para eliminar la bentonita de perforación	kg	300.00	15.00	4,500.00
14.-	Limpieza	hora	10.00	565.57	5,655.70
15.-	Tapa superior de rejilla desmontable a base de cuadrado de 1/2" en cuadros de 10 x 10 cm. suministro y colocación	pza	1.00	2,500.00	2,500.00
16.-	Limpieza superficial, accesos y retiro de excedentes	lote	1.00	8,500.00	8,500.00
	sub total				349,982.70
	I.V.A. 15 %				52,497.41
	suma				402,480.11

Notas:

\* La herramienta necesaria para hacer las ampliaciones deberá amortizarse en un mínimo de cinco pozos; si se perfora solamente uno, se cargarán \$ 25,000 por el amplificador de 22" a 36" y \$ 30,000 por el amplificador de 36" a 42"



\* El presupuesto anterior fué proporcionado por la Empresa ARMADRILL S. A. de C. V. , y se presenta únicamente con carácter ilustrativo , a valor real a ésta fecha .

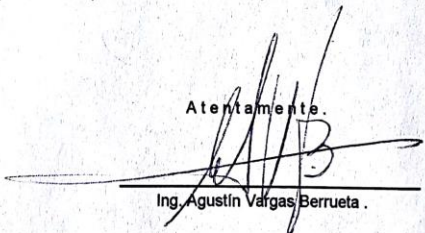
\* El tiempo de ejecución será de aproximadamente seis semanas a partir del inicio en campo .

\* Si se lleva a efecto éste proyecto de prueba , será necesario instalar en el pozo un medidor de flujo para monitorear el rendimiento real de operación ; el costo de éste aparato no está incluido , pero supongo que el SIAPA o algún organismo oficial podrá suministrarlo con carácter de préstamo .

En la plática personal que hemos llevado a cabo para puntualizar acerca de éste tema , acordamos que , además - de proceder a ésta prueba , elaboraríamos un ante proyecto general de perforación de pozos de Inyección forzada recurriendo a los datos relativos en poder de diversas instancias oficiales ; Me permito recordar a Usted que , al - respecto , de continuar siendo de Su Interés , será necesario recabarlos previa solicitud Oficial a las dependencias que correspondan , por lo que quedo a Sus órdenes para efectos consecuentes .

Guadalajara , Jalisco , a 6 de marzo de 1998 .

Atentamente.



Ing. Agustín Vargas Berrueta .

SEDEUR/1190/99

"1999, año de la Vivienda en Jalisco"

Guadalajara, Jal., a 06 de Julio de 1999.

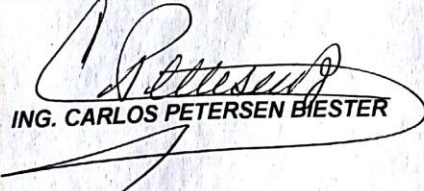
**SEDEUR**  
SECRETARIA DE  
DESARROLLO URBANO

**C. ING. AGUSTIN VARGAS BERRUETA**  
**CIRCUNVALACIÓN ORIENTE N° 129**  
**ZAPOPAN, JALISCO.**  
**P R E S E N T E .**

Por este conducto, reciba mi agradecimiento por el envío del presupuesto con fecha 22 de Julio del año en curso, referente al pozo de prueba para la inyección forzada de aguas pluviales al subsuelo profundo; así mismo, me permito manifestarle que el asunto en cuestión se tratará con el Ing. José Luis González Velasco, Director General del S.I.A.P.A.

Sin otro particular por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

**A T E N T A M E N T E**  
**"SUFRAGIO EFECTIVO. NO REELECCIÓN"**  
**EL SECRETARIO DE DESARROLLO URBANO**

  
**ING. CARLOS PETERSEN BIESTER**

C.c.p. Ing. José Luis González Velasco, Director General del S.I.A.P.A..

CPB/GUG/ef/eot\* D-425

SECRETARIA PARTICULAR  
AV. PROL. ALCALDE No. 1351  
EDIFICIO "B"  
TELS. 823-63-64, 823-75-19  
EXT. 202 Y 203  
GUADALAJARA, JALISCO,  
MEXICO.

Recibida  
el 19/Agosto/  
a las 12:00



## 4.4 Cotización de perforación y ademe para pozo de inyección profunda



**PERCALI, S.A. DE C.V.**

Honorato de Balzac #108 Jardines Vallarta. Zapopan, Jalisco. C.P. 45027 Tel: (33) 36733543

12-jun-2017

ING. LUIS IGNACIO VANEGAS ESPINOSA  
TEL: 33-11491803  
[luisvanegas@iteso.mx](mailto:luisvanegas@iteso.mx)  
PRESENTE

PRESUPUESTO NÚMERO:  
069/2017-MZA

**PRESUPUESTO:**  
PARA LA PERFORACIÓN DE UN POZO DE INFILTRACIÓN (30" X 100 M) EN LAS INSTALACIONES DE LA UNIVERSIDAD ITESO, LOCALIZADAS EN EL MUNICIPIO DE SAN PEDRO TLAQUEPAQUE, JALISCO.

NUMERO	CONCEPTO	CANTIDAD	UNIDAD	P. UNITARIO	IMPORTE
1	MOVIMIENTO DE EQUIPO DE PERFORACION COMPLETO HASTA UNA DISTANCIA DE 15 KM. DESDE GUADALAJARA.	PDA.	1.00	\$ 14,252.01	\$ 14,252.01
2	TRASLADO DE EQUIPO DE PERFORACION COMPLETO POR KM. EN PAVIMENTO.	KM	-	\$ 96.12	\$ -
3	TRASLADO DE EQUIPO DE PERFORACION COMPLETO POR KM. EN TERRACERIA.	KM	-	\$ 112.14	\$ -
4	TRASLADO DE EQUIPO DE PERFORACION COMPLETO POR KM. EN BRECHA.	KM	-	\$ 168.22	\$ -
5	INSTALACION Y DESMANTELAMIENTO DE EQUIPO DE PERFORACION.	PDA.	1.00	\$ 9,440.07	\$ 9,440.07
6	EXCAVACION Y RELLENO DE FOSAS PARA LODOS BENTONÍFICOS.	PDA.	1.00	\$ 7,398.23	\$ 7,398.23
7	SUMINISTRO DE BENTONITA PARA PREPARAR LODOS DE PERFORACION.	TON.	12.00	\$ 2,510.00	\$ 30,120.00
8	SUMINISTRO DE AGUA PARA PREPARAR LODOS Y LIMPIEZA DEL POZO.	M3	450.00	\$ 60.00	\$ 27,000.00
9	PERFORACIÓN EXPLORATORIA A 17 1/2" DE DIAMÉTRO, DE 0.00 A 100.00 M:				
	MATERIAL TIPO I.	M	15.00	\$ 1,360.97	\$ 20,414.55
	MATERIAL TIPO II.	M	35.00	\$ 2,618.82	\$ 91,658.70
	MATERIAL TIPO III.	M	50.00	\$ 5,389.44	\$ 269,472.00
10	PERFORACIÓN EXPLORATORIA A 17 1/2" DE DIAMÉTRO, DE 100.00 A 200.00 M:				
	MATERIAL TIPO I.	M	-	\$ 1,790.36	\$ -
	MATERIAL TIPO II.	M	-	\$ 3,039.40	\$ -
	MATERIAL TIPO III.	M	-	\$ 5,704.55	\$ -
12	AMPLIACION DE LA PERFORACIÓN DE 17 1/2" A 24" DE DIAMÉTRO DE 0.00 A 100.00 M:				
	MATERIAL TIPO I.	M	15.00	\$ 1,338.47	\$ 20,077.05
	MATERIAL TIPO II.	M	35.00	\$ 2,196.27	\$ 76,869.45
	MATERIAL TIPO III.	M	50.00	\$ 4,623.25	\$ 231,162.50
12	AMPLIACION DE LA PERFORACIÓN DE 17 1/2" A 24" DE DIAMÉTRO DE 0.00 A 100.00 M:				
	MATERIAL TIPO I.	M	-	\$ 1,371.42	\$ -
	MATERIAL TIPO II.	M	-	\$ 2,673.90	\$ -
	MATERIAL TIPO III.	M	-	\$ 4,738.58	\$ -

[www.percali.com.mx](http://www.percali.com.mx)

HOJA 1 DE 3



## PERCALI, S.A. DE C.V.

Honorato de Balzac #108 Jardines Vallarta. Zapopan, Jalisco. C.P. 45027 Tel: (33) 36733543

NUMERO	CONCEPTO	CANTIDAD	UNIDAD	P. UNITARIO	IMPORTE
13	AMPLIACION DE LA PERFORACIÓN DE 24" A 36" DE DIAMÉTRO DE 0.00 A 100.00 M:				
	MATERIAL TIPO I.	M	15.00	\$ 1,702.71	\$ 25,540.65
	MATERIAL TIPO II.	M	35.00	\$ 2,544.20	\$ 89,047.00
	MATERIAL TIPO III.	M	50.00	\$ 6,240.10	\$ 312,005.00
14	AMPLIACION DE LA PERFORACIÓN DE 24" A 36" DE DIAMÉTRO DE 100.00 A 200.00 M:				
	MATERIAL TIPO I.	M	-	\$ 1,804.87	\$ -
	MATERIAL TIPO II.	M	-	\$ 2,722.30	\$ -
	MATERIAL TIPO III.	M	-	\$ 6,614.50	\$ -
15	SUMINISTRO DE TUBERÍA DE ACERO LISA 30" X 1/4" Ø.	M	50.00	\$ 3,028.80	\$ 151,440.00
16	SUMINISTRO DE TUBERÍA DE ACERO RANURADA, 30" X 1/4" Ø.	M	50.00	\$ 3,258.00	\$ 162,900.00
18	COLOCACIÓN DE TUBERÍA: 30" X 1/4" Ø.	M	100.00	\$ 201.27	\$ 20,127.00
20	CEMENTACION DEL ESPACIO ANULAR ENTRE LA PERFORACIÓN DEL POZO Y LA TUBERÍA DE CONTRADEME.	M3	-	\$ 3,389.04	\$ -
21	EQUIPO DE PERFORACIÓN PARADO DURANTE EL FRAGUADO DE CEMENTACIÓN O POR CAUSAS IMPUTABLES LA CLIENTE.	HORA	-	\$ 1,292.80	\$ -
22	SUMINISTRO, FLETE Y COLOCACIÓN DE FILTRO DE GRAVA.	M3	28.00	\$ 1,502.91	\$ 42,081.48
23	SUMINISTRO, FLETE Y COLOCACIÓN DE DISPERSOR DE ARCILLAS.	LITRO	150.00	\$ 40.82	\$ 6,123.00
24	EQUIPO DE PERFORACIÓN TRABAJANDO DURANTE LA LIMPIEZA DEL POZO Y/O EN OPERACIONES ORDENADAS POR EL CLIENTE.	HORA	24.00	\$ 1,789.17	\$ 42,940.08
SUBTOTAL:					\$ 1,650,068.77

### RESUMEN

PERFORACIÓN DE POZO DE INFILTRACIÓN  
ADEME DE POZO PROFUNDO

	\$ 1,335,728.77
	\$ 314,340.00
SUBTOTAL	\$ 1,650,068.77
16% IVA	\$ 264,011.00
TOTAL	\$ 1,914,079.77

\*\*\* UN MILLON NOVECIENTOS CATORCE MIL SETENTA Y NUEVE PESOS 77/100 M.N.\*\*\*

## 4.5 Cotización de instrumentación para muestreo y monitoreo en pozos



Perfoparts S.A. de C.V.

Ciencias de la Tierra

RFC : PER760130PV 6

Viveros de Asís 141, Viveros de la Loma, Tlalnepantla, Edo. de México. C.P. 54080

### Cotización

Folio: 17034

Fecha: AGOSTO 9, 2017.

Página: 1

#### DATOS DEL CONTACTO

**\*\*IMÁGENES ILUSTRATIVAS\*\***

RAZÓN SOCIAL: ITESO AC

CALLE: Periférico Sur Manuel Gómez Morín

No: # 8585

COLONIA: ITESO

CIUDAD: Tlaquepaque











ESTADO: Jalisco

CP: 45604







Ing. Luis Ignacio Vanegas

luisvanegas@iteso.mx

(045)3311491803

Part	Muestra	Cant	Unid	Código	Descripción	P.Unitario	Importe	Mon
1		1	PZA.	FOI0033	CINTA DE SEÑALES ROJA BIODEGRADABLE 2cmX 65m (17-100-1009) T.E. Inmediato	52.63	52.63	M.N.
2		1	PZA.	FOI0032	CINTA DE SEÑALES NARANJA BIODEGRADABLE 2cmX 65m (17-100-1008) T.E. Inmediato	52.63	52.63	M.N.
3		2	KG	GEN0104	BOLSA POLIETILENO P/MUESTRAS 30x50cms. CAL. 800 (17/Kg). T.E. Inmediato	60.75	121.50	M.N.
4		1	PZA.	AMI1207	SONDA DE NIVELES 150mP7 (110193) BOLSAY GUÍA (110193) T.E. 3 semanas	28,129.92	28,129.92	M.N.
5		1	PZA.	AMI1176	SONDA TLC 150m(NIVELES, CONDUCTIVIDAD Y TEMPERATURA) (110322) BOLSA Y GUÍA. T.E. 3 semanas	39,674.88	39,674.88	M.N.
6		1	PZA.	AMN0062	SOLUCIÓN P/CALIBRACIÓN 5,000µS/cm460ml(HI7039L) T.E. '????'	589.49	589.49	M.N.
7		1	PZA.	AMI1285	LEVEL OGGER EDGE LT M200 (110378) T.E. 3 semanas	13,605.90	13,605.90	M.N.
8		1	PZA.	AMI0561	LEVEL OGGER EDGE LT M100 (110184) T.E. inmediato	13,605.90	13,605.90	M.N.
9		1	PZA.	AMI0557	BAROLOGGER EDGE M1.5, F5 (110179)	7,008.96	7,008.96	M.N.
10		1	PZA.	AMI1270	INTERFAZ PARA LEVEL OGGER (111348) T.E. inmediato	7,906.11	7,906.11	M.N.



11		1	PZA. AMI0807	PAQ. DE COMUNICACIONES PARA LEVELOGGER LECTURA DIRECTA (107379) T.E. inmediato	8,077.92	8,077.92	M.N.
12		1	PZA. AMI0179	ADAPTADOR DE LECTURA DIRECTA A LECTOR ÓPTICO (112123) T.E. inmediato	1,336.72	1,336.72	M.N.
13		200 M	AMI0817	CABLE SOPORTE A. INOX. P/LEVELOGGER T.E. inmediato	9.20	1,840.00	M.N.
14		5	PZA. AMI0699	BAILER PVC CLARO 1.05"x1' UNA VÁLVULA (BPCS1.05X12) T.E. inmediato	634.17	3,170.85	M.N.
15		1	PZA. AMI1006	RAINLOGGER (111108) T.E. inmediato	6,314.58	6,314.58	M.N.
16		1	PZA. AMI1004	PLUVIÓMETRO 8" P/RAINLOGGER (RG600M) T.E. inmediato	21,341.20	21,341.20	M.N.

Observaciones:

CONDICIONES DE PAGO: Transferencia o depósito bancario antes de embarcar.  
ENTREGA: Por Paquetería Estafeta o Paquete Express

CONDICIONES DE PAGO: **Contado**

PRECIOS Y EXISTENCIAS SUJETOS A CAMBIO SIN PREVIO AVISO

VIGENCIA: **8 días**

Quedo a sus órdenes:

Agente: Karen Quezada Galan

2169-1209

email: karen.quezada@perfoparts.mx

Cuenta  
Sucursal  
Plaza  
CLABE  
Beneficiario

CUENTA BANCOMER

0447223285  
3475  
01 Parque Industrial Naucalpan  
012180004472232857  
PERFOPARTS SA DE CV

CUENTA BANAMEX

4083388  
326 Cuatro Caminos  
01 México  
002180032640833882  
PERFOPARTS SA DE CV

Importe	\$152,829.20
Subtotal	\$152,829.20
I.V.A.	\$24,452.67
<b>TOTAL</b>	<b>\$177,281.87</b>

¿Le estoy atendiendo bien? Cualquier queja o comentario favor de escribir a [atencionclientes@perfoparts.mx](mailto:atencionclientes@perfoparts.mx), donde se le dará prioridad a su solicitud

[www.perfoparts.mx](http://www.perfoparts.mx) Tel. Conmutador (55) 53629129 / Fax (55) 21691207

Página: 2